

Федеральное агентство по образованию
Уральский государственный университет
им. А. М. Горького

Ф И З И К А К О С М О С А

Труды 36-й Международной
студенческой научной конференции

29 января — 2 февраля 2007 г.

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2007

УДК 524.4
Ф 503

Печатается по решению
организационного
комитета конференции

Физика Космоса: Тр. 36-й Международ. студ. науч.
Ф 503 конф., Екатеринбург, 29 янв. — 2 февр. 2007 г. — Екате-
ринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. — 302 с.

ISBN 5-7996-0258-7

Редколлегия:

П. Е. Захарова (ответственный редактор), Э. Д. Кузнецов,
А. Б. Островский, С. В. Салий, Е. И. Старицин (Уральский государ-
ственный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский
государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии
РАН)

УДК 524.4

ISBN 5-7996-0258-7

© Уральский государственный
университет, 2007

ФИЗИКА КОСМОСА
36-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии и геодезии
Астрономическая обсерватория

29 января — 2 февраля 2007 г.

Екатеринбург, Россия

Научный организационный комитет:

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский государственный университет), Т. В. Бордовицына (Томский государственный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский государственный университет), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет), Л. В. Рыхлова (Институт астрономии РАН), Н. А. Сахибуллин (Казанский государственный университет), О. К. Сильченко (ГАИШ МГУ), А. М. Соболев (Уральский государственный университет), Е. И. Старицин (Уральский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (Институт прикладной физики РАН), В. В. Орлов (Научно-исследовательский астрономический институт СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет), А. А. Соловьев (Главная Пулковская астрономическая обсерватория РАН).

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района
г. Екатеринбурга

Уральский государственный университет им. А. М. Горького

Программа конференции

Место проведения — Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета.

Открытие конференции		Ауд. № 15.
29 января, понедельник	15.00	

Пленарные заседания		Ауд. № 15.
29 января, понедельник	15.45–18.45	
30 января, вторник	10.00–18.45	
31 января, среда	10.00–18.45	
1 февраля, четверг	14.30–18.45	

Семинар «Физика звезд»		Ауд. № 10.
31 января, среда	10.00–11.45	

Семинар «Галактики и звездообразование»		Ауд. № 10.
31 января, среда	14.30–17.30	

Семинар «Астрометрия и небесная механика		Ауд. № 10.
1 февраля, четверг	14.30–17.50	

Стендовые доклады		Холл
1 февраля, четверг	12.00–13.00	

Закрытие конференции		Ауд. № 15.
1 февраля, четверг	20.00	

29 января, понедельник, ауд. 15

15.00–15.25 ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ (выступления председателя научного организационного комитета конференции К. В. Холшевникова, президента Уральского университета В. Е. Третьякова, директора Астрономической обсерватории П. Е. Захаровой)

15.25–15.40 Людмила Вячеславовна Петрова (специалист по информации Британского совета в Екатеринбурге)
Проекты Британского совета в области науки и высшего образования.

Председатель Константин Владиславович Холшевников,
д-р физ.-мат. наук

15.45–16.30 Наиль Абдуллович Сахибуллин (д-р физ.-мат. наук, КГУ)
Сто лет теории звездных атмосфер.

16.30–17.15 Александр Анатольевич Соловьев (д-р физ.-мат. наук, ГАО РАН)
Природа солнечных пятен: современные наблюдения и модель.

17.15–17.30 Перерыв

17.30–17.45 Юрий Михайлович Кривошеев (5 курс, ИКИ РАН)
Расчет комптонизации спектра излучения методом Монте-Карло.

17.45–18.00 Александр Михайлович Поляков (5 курс, УрГУ)
Влияние 2S3 метастабильного уровня гелия на ионизационную структуру туманности.

18.00–18.45 Александр Сергеевич Гусев (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)
Поверхностная фотометрия галактик: цели и методы.

30 января, вторник, ауд. 15

Председатель Дмитрий Зигфридович Вибе, д-р физ.-мат. наук

10.00–10.45 Ольга Касьяновна Сильченко (д-р физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)
Эволюционный синтез интегрального излучения галактик.

10.45–11.30 Дмитрий Дмитриевич Соколов (д-р физ.-мат. наук, физфак МГУ)
Циклическая активность Солнца и звезд и динамо-волны.

11.30–11.45 Перерыв

11.45–12.00 Дмитрий Сергеевич Свинкин (6 курс, СПбГПУ)
Программа обработки временной истории гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте «Конус-Винд».

12.00–12.15 Александра Михайловна Зубарева (5 курс, КГУ)
Спектроскопия и многоцветная фотометрия поляра MT DRA (RX J1846.9+5538).

12.15–12.30 Александра Викторовна Веледина (3 курс, СПбГУ)
Эволюция спектра излучения при комптоновском рассеянии.

12.30–12.45 Жаргал Викторович Доржиев (5 курс, БГУ)
Исследование короткоживущих мелкомасштабных магнитных арок по наблюдениям верхней атмосферы в линии He 10830 Å.

12.45–13.00 Ирина Петровна Отто (5 курс, БГУ)
Исследование колебательных и квазистационарных движений в атмосфере солнечных пятен.

13.30–14.15 Обед

30 января, вторник, ауд. 15

Председатель Виктор Владимирович Орлов, д-р физ.-мат. наук

14.30–15.15 Борис Михайлович Шустов (д-р физ.-мат. наук, ИНАСАН)

Галактики и межгалактическая среда: механизмы эволюционных взаимосвязей.

15.15–16.00 Андрей Михайлович Соболев (канд. физ.-мат. наук, УрГУ)

Молекулы в истечениях из массивных молодых звездных объектов.

16.00–16.15 Дмитрий Сергеевич Насонов (5 курс, МГУ)

Измерение лучевых скоростей с применением абсорбционной ячейки.

16.15–16.30 Алексей Алексеевич Смирнов (4 курс, СПбГУ)

Неточности в спектральной классификации звезд каталога TYCHO-2 SPECTRAL TYPE.

16.30–16.45 Татьяна Алексеевна Чернецова (4 курс, КГУ),

А. Б. Виноградова (5 курс, КГУ), В. С. Клеткина (5 курс, КГУ)

Содержание иттрия и циркония у звезд различных Галактических населений.

16.45–17.00 Перерыв

**17.00–17.15 Андрей Андреевич Даниленко (6 курс, СПбГПУ),
Д. А. Зюзин (6 курс, СПбГПУ), Д. С. Свинкин (6 курс, СПбГПУ)**

Геометрия столкновения двух сверхзвуковых потоков и морфология туманностей вокруг быстро движущихся нейтронных звезд.

17.15–17.30 Александр Владимирович Додин (3 курс, МГУ)

Оценка роли Лайман-альфа излучения в ионизации протопланетных дисков.

17.30–17.45 Владислав Викторович Бочанцев (4 курс, УрГУ)

Сравнение результатов определения числа звезд и радиуса рассеянных звездных скоплений в оптическом и ИК-диапазонах.

- 17.45–18.00 Саян Тимурович Хамагаев** (5 курс, БГУ)
Исследование временных вариаций крупномасштабных солнечных полей Солнца.
- 18.00–18.15 Мария Михайловна Митрошина** (5 курс, БГУ)
Исследование инструментальной линейной поляризации БСВТ ИСЗФ СО РАН.
- 18.15–18.30 Марина Александровна Вторушина** (4 курс, БГУ)
Исследование хромосферы Солнца по фильтрограммам в линии КCaII.
- 18.30–18.45 Александр Николаевич Шолойко** (6 курс, БГУ)
Сопоставление эквивалентных ширин линии H и параметров Стокса в протонной вспышке для линий с центральным обращением и без.

31 января, среда, ауд. 15

Председатель Марат Габдуллович Мингалиев, д-р физ.-мат. наук

10.00–10.45 Игорь Иванович Зинченко (д-р физ.-мат. наук, ИПФ РАН)

Радиоастрономия завтрашнего дня.

10.45–11.00 Денис Александрович Грачев (5 курс, МГУ), М. Е. Артюшкова (6 курс, МГУ)

Распространение света во Вселенной с пространственными неоднородностями.

11.00–11.15 Дмитрий Александрович Зюзин (6 курс, СПбПУ)

Зависимость линейного размера радиоисточника от красного смещения.

11.15–11.30 Маргарита Леруновна Хабибуллина (5 курс, КГУ)

Статистические исследования слабых радиоисточников в полосе глубоких обзоров неба на радиотелескопе РАТАН-600.

11.30–11.45 Перерыв

11.45–12.00 Марина Михайловна Тудупова (5 курс, ТГУ)

Построение профилей низкочастотного когерентного излучения пульсаров на основе модели синхротронного излучения.

12.00–12.15 Оксана Владимировна Шелемей (4 курс, УрГУ), А. Б. Островский (преподаватель, УрГУ), А. М. Соболев (канд. физ.-мат. наук, УрГУ)

Влияние вращения источника на форму и положение мазерных пятен в модели турбулентного слоя.

12.15–12.30 Наталья Вадимовна Панкратова (5 курс, УрГУ),

А. М. Соболев (канд. физ.-мат. наук, УрГУ), М. С. Кирсанова (аспирант, ИНАСАН), Т. С. Васюнина (аспирант, МРІА), В. В. Крушинский (научный работник, УрГУ)

Инфракрасные и оптические свойства областей образования массивных звезд в рукаве Персея.

12.30–12.45 Михаил Владимирович Шаповалов (6 курс, РГУ)

Характер связи между возрастом и металличностью в тонком диске.

12.45–13.00 Сергей Александрович Хоперсков (2 курс, ВолГУ)

Механизмы разогрева звездного галактического диска.

13.30–14.15 Обед

31 января, среда, ауд. 15

Председатель Лидия Васильевна Рыхлова, д-р физ.-мат. наук

14.30–15.15 Татьяна Валентиновна Бордовицына (д-р физ.-мат. наук, ТГУ)

Космический мусор. Образование и динамическая эволюция.

15.15–16.00 Константин Владиславович Холшевников (д-р физ.-мат. наук, АИ СПбГУ), Эдуард Дмитриевич Кузнецов (канд. физ.-мат. наук, УрГУ)

Орбитальная эволюция Солнечной системы.

16.00–16.15 Николай Эдуардович Бритаевский (2 курс, ОНУ)

Прогноз времени существования низкоорбитальных космических объектов.

16.15–16.30 Евгений Александрович Смирнов (3 курс, СПбГУ)

Современные численные методы интегрирования уравнений движения астероидов, сближающихся с Землей.

16.30–16.45 Рустем Ренатович Загретдинов (4 курс, КГУ)

Планирование спутниковых геодезических измерений, цели и методы.

16.45–17.00 Перерыв

17.00–17.15 Владимир Владимирович Троянский (3 курс, ОНУ)

Модель земной тени в формализме численной теории DE405.

17.15–17.30 Мария Анатольевна Бутенко (4 курс, ВолГУ)

Свойства семейств периодических орбит в галактическом звездном баре.

17.30–17.45 Александр Сергеевич Степанищев (5 курс, СПбГУ)

Влияние звездных скоплений на параметры эллипсоида скоростей.

17.45–18.00 Вера Васильевна Коваль (5 курс, РГУ)

Зависимости параметров эллипсоидов скоростей F-G-звезд тонкого диска от возраста.

18.00–18.45 Виктор Владимирович Орлов (д-р физ.-мат. наук, СПбГУ), Алия Ибрагимовна Мартынова (преподаватель, СПбГЛТА)

Проблема трех тел в небесной механике и астрофизике.

1 февраля, четверг, ауд. 15

Председатель Ольга Касьяновна Сильченко, д-р физ.-мат. наук

14.30–15.15 Михаил Евгеньевич Прохоров (д-р физ.-мат. наук, ГАИШ), О. С. Бартунов (научный работник, ГАИШ)
Виртуальные обсерватории.

15.15–16.00 Владимир Андреевич Марсаков (канд. физ.-мат. наук, РГУ)
Звезды внегалактического происхождения в гало Галактики.

16.00–16.45 Дмитрий Зигфридович Вибе (д-р физ.-мат. наук, ИНАСАН)
Протопланетные диски.

16.45–17.00 Перерыв

17.00–17.15 Андрей Михайлович Соболев (канд. физ.-мат. наук, УрГУ)
Резюме стендовой секции.

17.15–18.00 Николай Григорьевич Макаренко (д-р физ.-мат. наук, ГАО РАН)
Нелинейные методы прогноза временных рядов.

18.00–18.45 Марат Габдуллович Мингалиев (д-р физ.-мат. наук, САО)
Реликтовое излучение и космология.

20.00 ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

Семинар «Физика звезд»
31 января, среда, ауд. 10, 10⁰⁰—11⁴⁵

Председатель Евгений Игоревич Старицин, канд. физ.-мат. наук

10.00–10.15 Валентин Федорович Есипов (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Радио- и оптическая спектроскопия звезд поздних классов.

10.15–10.35 Алмаз Ильсурович Галеев (канд. физ.-мат. наук, КГУ), И. Ф. Бикмаев (канд. физ.-мат. наук, КГУ)

Звезды — двойники и аналоги Солнца.

10.35–10.45 Алмаз Ильсурович Галеев (канд. физ.-мат. наук, КГУ), И. Ф. Бикмаев (канд. физ.-мат. наук, КГУ), В. В. Шиманский (канд. физ.-мат. наук, КГУ), Д. В. Иванова (канд. физ.-мат. наук, КГУ)

Проблемы исследования звезд типа δ Щита по наблюдениям на телескопе РТТ150.

10.45–11.00 Алла Валерьевна Кожевникова (научный работник, АО УрГУ), И. Ю. Алексеев (канд. физ.-мат. наук, КрАО), П. А. Хекерт (УЗК), В. П. Кожевников (канд. физ.-мат. наук, УрГУ)

Активность двух короткопериодических двойных систем типа RS CVn — BH Vir и WY Cen.

11.00–11.15 Галина Николаевна Дремова (канд. физ.-мат. наук, РФЯЦ—ВНИИТФ), М. А. Свечников (д-р физ.-мат. наук, УрГУ)

Эффект приливной эволюции в оценке возраста ТДС.

11.15–11.30 Дмитрий Алексеевич Кононов (аспирант, ИНАСАН)

Исследование структуры течения вещества в системе SS Cyg методом доплеровской томографии.

11.30–11.45 Надежда Михайловна Костокрыз (аспирант, ГАО НАНУ)

Вероятные причины долгопериодических изменений геометрического альбедо Урана.

Семинар «Галактики и звездообразование»
31 января, среда, ауд. 10, 14³⁰—17⁰⁰

Председатель Борис Михайлович Шустов, д-р физ.-мат. наук

14.30–14.45 Роман Александрович Алексейчук (аспирант, ВолГУ)

Поведение облачной компоненты Галактики в области радиуса коротации.

14.45–15.00 Тарас Николаевич Якобчук (аспирант, ГАО НАНУ)
Звездный состав голубой компактной карликовой галактики SBS 1415+437.

15.00–15.15 Евгений Павлович Курбатов (аспирант, ИНАСАН)
О скорости звездообразования и диссипации энергии в моделях галактик.

15.15–15.30 Сергей Юрьевич Малафеев (научный работник, ННГУ)

Исследование вариации степени ионизации в областях образования массивных звезд.

15.30–15.45 Никита Романович Троицкий (аспирант, ИПФ РАН), И. И. Зинченко (д-р физ.-мат. наук, ИПФ РАН), Л. Е. Пирогов (канд. физ.-мат. наук, ИПФ РАН)

Оценки физических параметров областей массивного звездообразования, связанных с «холодными» IRAS источниками.

15.45–16.00 Мария Сергеевна Кирсанова (аспирант, ИНАСАН), А. М. Соболев (канд. физ.-мат. наук, УрГУ), Л. Е. Юханссон (OSO), М. Томассон (OSO), А. П. Цивилев (канд. физ.-мат. наук, ПРАО ФИ РАН)

Исследование звездообразования в области G173.69+2.87.

16.00–16.15 Александр Иванович Семенюк (аспирант, ВолГУ), В. В. Мусцовой (д-р физ.-мат. наук, ВолГУ), С. С. Храпов (канд. физ.-мат. наук, ВолГУ)

Численное моделирование вторжения радиоджетов из активных ядер галактик в окружающую среду.

16.15–16.30 Кирилл Алексеевич Мартыанов (аспирант, ИПФ РАН)

Особенности динамических спектров излучения релятивистских ударных волн с потерями.

16.30–16.45 **Нина Сергеевна Виноградова** (4 курс, УрГУ)

Положение и собственное движение звезд в поле РЗС NGC6882/5.

16.45–17.00 **Мария Сергеевна Храмцова** (3 курс, УрГУ)

Вычисление избытка цвета для РЗС по данным каталога 2MASS.

**Семинар «Астрометрия и небесная механика»
1 февраля, четверг, ауд. 10, 14³⁰—17³⁰**

Председатель Эдуард Дмитриевич Кузнецов, канд. физ.-мат. наук

14.30–15.15 Валериан Никитич Семенов (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Современные астрометрические каталоги.

15.15–16.00 Николай Борисович Железнов (канд. физ.-мат. наук, ИПА РАН)

Астероиды, сближающиеся с Землей.

**16.00–16.15 Л. Е. Быкова (канд. физ.-мат. наук, НИИ ПММ ТГУ),
Татьяна Юрьевна Галушина (канд. физ.-мат. наук, НИИ ПММ ТГУ), А. П. Батурин (канд. физ.-мат. наук, НИИ ПММ ТГУ)**

О программной системе построения поисковых эфемерид астероидов.

16.15–16.30 Антон Александрович Токовенко (аспирант, ОАО)

Модель сближения астероида APOPHIS 99942 с Землей.

16.30–16.45 Вахит Шамильевич Шайдулин (аспирант, СПбГУ)

Сравнение гармонических коэффициентов некоторых современных моделей гравитационного потенциала Земли.

16.45–17.00 Перерыв

17.00–17.15 Роман Владимирович Балугев (аспирант, СПбГУ)

Поиск и определение орбит внесолнечных планет методом лучевых скоростей.

Стендовые доклады
1 февраля, четверг, холл, 12⁰⁰—13⁰⁰

Председатель Андрей Михайлович Соболев, канд. физ.-мат. наук

1. **А. М. Занкович, И. Г. Коваленко** (ВолГУ)
Устойчивость ударной волны в остатке сверхновой на седовской стадии: теория и лабораторное моделирование.
2. **П. Е. Захарова, Д. В. Гламазда, Г. Т. Кайзер, Э. Д. Кузнецов, Ю. З. Вибе, Л. К. Малышева, А. А. Попов** (АО УрГУ)
Позиционные ПЗС наблюдения на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории.
3. **П. Е. Захарова, Э. Д. Кузнецов** (АО УрГУ)
Оценка точности позиционных наблюдений геосинхронных спутников на гибридной телевизионной установке телескопа АЗТ-3 АО УрГУ.
4. **Н. Д. Калинина, С. В. Салий** (АО УрГУ)
Молекулярные ядра NGC 6334I и NGC 6334I(N).
5. **И. Г. Коваленко, А. Н. Колов, А. М. Занкович** (ВолГУ)
Турбулентные модели квазисферической аккреции.
6. **Д. Н. Кожевников** (БГУ)
Распределение эквивалентных ширин профилей параметра Стокса.
7. **И. В. Коробцев** (БГУ)
Фотометр ИК-диапазона для астрономических наблюдений.
8. **А. В. Кочеров** (ЧелГУ)
Моделирование коллапса межзвездных молекулярных облаков.
9. **Э. Д. Кузнецов** (УрГУ), **А. О. Кудрявцев** (МГУ)
Исследование особенностей движения в окрестности неустойчивых стационарных точек геостационарной орбиты.
10. **Г. В. Лямова** (АО УрГУ)
Особенности быстрых колебаний солнечных пятен в разных группах.
11. **Д. А. Малыгин** (БГУ)
Сравнение эквивалентных ширин профилей параметра Стокса в линии H с самообращением и в усах.

12. **А. И. Малышев** (ИГГ УРО РАН), **Л. К. Малышева** (УрГУ)
Условия образования предбиологических состояний на Титане.
13. **Т. П. Никифорова, С. В. Сукманова, А. А. Калинин, А. И. Шагабутдинов** (АО УрГУ)
Пробные наблюдения протуберанцев в АО УрГУ с ПЗС-камерой.
14. **А. А. Попов, И. С. Заложных, В. В. Крушинский** (УрГУ)
Проект 40-см телескопа Астрономической обсерватории УрГУ.
15. **Г. С. Ромашин** (АО УрГУ)
Активные ИСЗ на ГСО в зоне 0—120 Е.
16. **С. В. Салий, А. М. Соболев** (АО УрГУ)
Исследование физических условий в молекулярном облаке G305.21+0.21 по квазитепловым линиям метанола.
17. **А. И. Семенюк, В. В. Мусцевой** (ВолГУ)
Равновесная модель для исследования протяженных струйных выбросов из активных галактических ядер.

Обзорные лекции

Т. В. Бордовицына

Томский государственный университет

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР. ОБРАЗОВАНИЕ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Лекция посвящена проблемам моделирования процессов образования и динамической эволюции космического мусора.

Problems of simulation of space debris generation and its dynamic evolution are considered in this lecture

Общие сведения

Быстрое освоение космического пространства с момента запуска первого искусственного спутника Земли привело к его замусориванию. Околоземное пространство засорено отслужившими свой срок космическими аппаратами (КА), отработавшими верхними ступенями ракет-носителей, различными элементами конструкций типа переходников, крышек и т. п. Все это называется космическим мусором. Дополнительная засоренность возникает в результате преднамеренных или самопроизвольных взрывов на орбитах или при столкновении космических аппаратов. По данным [1], общее число объектов искусственного происхождения, зарегистрированных в околоземном космическом пространстве с момента запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) и по 1 января 2002 г. составляет 27 044. Из них 18 051 объект уже разрушен и сгорел в атмосфере. На орбитах на 1 января 2002 г. находилось 8 993 объекта, причем среди них было всего 2 853 космических аппарата, причем только 6 % функционирующих, а все остальное — космический мусор. Это только каталогизированные объекты. В целом предполагается, что в космосе сегодня находится около 14 000 объектов размером от 5—10 см и более, и только 4 % из них — работающие КА.

© Т. В. Бордовицына, 2007

По типу орбит все каталогизированные объекты делятся на следующие классы или области:

- LEO — low-Earth orbit, т. е. низкоорбитальные объекты;
- MEO — medium Earth orbits, объекты между LEO и GEO;
- GEO — geostationary orbits, объекты на геостационарных орбитах;
- GTO — GEO transfer orbits, объекты на орбитах перехода в область GEO;
- NEO — highly eccentric orbits, объекты с большими эксцентриситетами орбит.

Последние два класса в значительной степени совпадают.

В процентном отношении все каталогизированные аппараты делятся по областям следующим образом LEO (с высотами менее 2000 км) — 69.2 %; MEO — 3.9 %; GEO — 7.8 %; NEO/GTO — 9.7 %. И небольшая фракция, примерно 150 объектов, выведена на внеземные орбиты.

Настоящая лекция посвящена проблемам моделирования процесса образования космического мусора за счет взрывов и столкновений и исследованию дальнейшей динамической эволюции совокупности образовавшихся объектов. Всего зарегистрировано 188 взрывов и столкновений аппаратов на орбитах, 173 из них занесены в каталог NASA «History of on-orbit satellite fragmentation», который можно найти по адресу <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov>. Данными этого каталога мы будем пользоваться в своих модельных расчетах.

Математическая модель распада космического аппарата

В момент распада космического аппарата в результате изотропного взрыва координаты каждого фрагмента совпадают с координатами родительского тела, а компоненты скорости фрагмента определяются по формулам [2–5]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{10} &= v_1 + \Delta v \cos \tau, \\ \dot{x}_{20} &= v_2 + \Delta v \sin \tau \cos \phi, \\ \dot{x}_{30} &= v_3 + \Delta v \sin \tau \sin \phi,\end{aligned}\tag{1}$$

где v_1, v_2, v_3 — компоненты скорости родительского объекта в геоцентрической системе координат. Параметры $\Delta v, \tau$ и ϕ задают величину

и направление вектора скорости фрагмента относительно родительского тела и рассматриваются как случайные величины, определяемые с помощью метода обратных функций по заданным функциям плотности распределения.

Плотности распределения для τ и ϕ задаются следующими формулами:

$$p(\phi) = \frac{1}{2\pi}, \quad (2)$$

$$p(\tau) = \frac{\sin \tau}{2}. \quad (3)$$

Для нахождения массы фрагмента предполагается, что плотность распределения масс описывается законом

$$p(\eta) = \frac{s-1}{1-\eta_{\max}^{1-s}} \eta^{-s}, \quad (4)$$

где $s = 0.83$; $\eta = m/m_{\min}$; $\eta \in (1, \eta_{\max}]$; $\eta_{\max} = m_{\max}/m_{\min}$, m_{\min} — минимальная масса фрагмента; m_{\max} — максимальная масса фрагмента.

Мы будем рассматривать две модели распада (изотропный взрыв и столкновение), отличающиеся формулами нахождения $\Delta \bar{v}$:

$$\Delta v = \left\{ \begin{array}{ll} \Delta \bar{v}(0.1 + 0.6\sqrt{3y}) & 0.00 \leq y \leq 0.75 \\ \Delta \bar{v}(1.3 - 0.6\sqrt{1-y}) & 0.75 \leq y \leq 1.00 \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где y — случайная величина от 0 до 1 с равномерной плотностью распределения, а $\Delta \bar{v}$ — средняя скорость, которая находится из соотношений:

а) взрыв

$$\log \Delta \bar{v} = -0.0676(\log d)^2 - 0.804 \log d - 1.514; \quad (6)$$

б) столкновение

$$\log \left(\frac{\Delta \bar{v}}{V} \right) = \left\{ \begin{array}{ll} A_c + B_c[\log(d/d_m)] & d \geq d_m, \\ A_c & d < d_m, \end{array} \right. \quad (7)$$

где $d_m = \frac{E^{1/3}}{C}$; V, E — относительная скорость и кинетическая энергия ударника; A_c, B_c, C_c — следующие постоянные:

$$\begin{aligned} A_c &= -0.125, \\ B_c &= -0.0676, \\ C_c &= 8.01 \cdot 10^8, \end{aligned}$$

а d — диаметр фрагмента (м). Считая, что фрагмент имеет сферическую форму, диаметр определяем по формуле $d = 2\sqrt{A/\pi}$, где A — площадь поперечного сечения фрагмента (м²), которая находится из логарифмонормального распределения

$$p(A) = \frac{1}{0.8\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{A} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln A - \ln(\bar{A})}{0.8} \right)^2}; \quad (8)$$

$$m = \begin{cases} 62.013\bar{A}^{1.13} & \bar{A} \geq 8.04 \cdot 10^{-5}, \\ 2030.33\bar{A}^{1.5} & \bar{A} \leq 8.04 \cdot 10^{-5}, \end{cases} \quad (9)$$

где m — масса фрагмента, кг; \bar{A} — средняя площадь поперечного сечения фрагмента, м².

Формула (7) справедлива только в случае катастрофического распада. Является ли столкновение катастрофическим, мы определяем из следующего условия:

$$\begin{cases} \frac{\alpha}{M_t} \leq 0.1 & \text{режим кратеризации,} \\ \frac{\alpha}{M_t} \geq 0.1 & \text{катастрофический распад.} \end{cases} \quad (10)$$

Величина α определяется по формуле

$$\alpha = 1.15 \cdot V^2 \cdot m_p.$$

При катастрофическом распаде $M_e = M_t + M_p$, а в режиме кратеризации $M_e = \alpha$, где M_e — извергнутая масса; M_t — масса космического аппарата; m_p — масса ударника, кг.

Для моделирования случайных величин ϕ , τ , η , α и A по заданным функциям плотности распределения (1), (3), (4), (5) и (8) соответственно мы использовали так называемый метод обратных функций.

Вычисление пространственной плотности фрагментов распада

Для построения пространственной плотности фрагментов область пространства, занятая осколками, разбивается на ячейки [2]. Разбиение осуществляется с определенным шагом по трем параметрам: расстоянию от центра Земли r [км], долготе λ [°] и широте ϕ [°].

Для построения алгоритма заданы следующие параметры:

- интервал времени, отсчитываемый от момента распада космического аппарата;
- широта, долгота и радиус-вектор фрагментов;
- для каждой ячейки — ее нижние границы по долготе, широте и высоте, объем ячейки и число фрагментов в ней.

Пространственная плотность фрагментов в заданный момент времени определяется как отношение числа фрагментов, попавших в ячейку пространства, к ее объему.

Таким образом, приведенный выше алгоритм вместе с численной моделью движения ИСЗ позволяет выполнять следующие действия:

- осуществлять статистическое моделирование распада космического аппарата на орбите;
- получать статистическое распределение орбит фрагментов в момент распада;
- проследивать эволюцию облака фрагментов;
- вычислять пространственную плотность фрагментов в заданный момент времени.

Проверка моделей распада по данным наблюдений

Объекты исследования

Построенные нами модели были проверены на примере большого количества аппаратов, но мы из-за недостатка места приведем результаты только для двух аппаратов [3].

Таблица 1. Массы и орбитальные элементы спутников

КА	m , кг	h , км	e	i , °	Ω , °	ω , °	M
Cosmos 1405	3000	330	0.002	65.0	126.1	318.1	42.0
Cosmos 375	1400	535	0.102	62.8	96.4	56.1	313.3

Тестирование моделей по данным наблюдений

Промоделировав распад КА, мы получаем координаты и скорости фрагментов сразу после события (взрыва или столкновения). Поскольку данные наблюдений фрагментов представлены на некоторый момент времени после распада (табл. 2), то приходится, пользуясь численной моделью движения ИСЗ, получать координаты фрагментов на нужный момент времени.

Таблица 2. Время до каталогизации и тип распада

КА	Δ	Тип распада
Cosmos 1405	1 час	Взрыв
Cosmos 375	4 месяца	Столкновение

Здесь Δt — интервал времени после распада, через который была произведена каталогизация фрагментов.

Результаты наблюдений фрагментов распада космического аппарата на орбите в каталоге NASA представлены в виде графиков зависимости апогея/перигея фрагментов от периода обращения. По данным, полученным в результате моделирования, были вычислены необходимые параметры и построены аналогичные графики [4]. Результаты приведены на рис. 1–4 в конце лекции.

Сравнивая результаты моделирования с данными наблюдений, мы видим, что модели взрыва довольно точно отражают действительность.

Образование тора фрагментов

Как видно из приведенных выше формул, главным результатом столкновения или взрыва на орбите является образование облака фрагментов, в котором каждая частица имеет свою скорость движения. По законам небесной механики такое облако не может существовать долго в гравитационном поле Земли. Постепенно облако превращается в тор и в дальнейшем эволюционирует в соответствии с действующими возмущениями. На рис. 5 показано образование тора фрагментов для КА, взорвавшегося в геостационарной зоне. Изображение дано в проекции на экваториальную плоскость Земли.

Исследование динамической эволюции совокупности фрагментов

Наиболее интересными с точки зрения динамики являются объекты геостационарной зоны и объекты ГТО, поэтому далее мы уделим основное внимание таким объектам. Для четырех взрывов КА, зарегистрированных в уже упоминавшемся каталоге NASA, мы приведем здесь результаты численного моделирования эволюции всего комплекса фрагментов, образовавшихся в процессе распада каждого из объектов. Основные данные о рассматриваемых КА приведены в табл. 3.

Таблица 3. Данные об объектах

КА	T_{exp}	H_a , км	H_p , км	i , град
Экран 2	23.06.78	35 800	35 785	0.1
Titan III T.	21.02.92	35 810	35 100	11.9
Cosmos 1317	25.01.84	39 055	1 315	62.8
Cosmos 862	15.03.77	39 645	765	63.2

КА Экран-2 — настоящий геостационар. Взрыв его батарей не привел, как известно [6], к распаду объекта, поэтому мы рассматриваем здесь модельный распад КА типа Экран-2, чтобы проследить эволюцию фрагментов распада в геостационарной зоне. Распад американского аппарата Титан III Транстейдж — это реальный взрыв КА на геосинхронной орбите. Оба КА серии Cosmos взорвались на вытянутых орбитах с апогеями, на высоте геостационарной зоны, причем один имеет низкий перигей, другой — высокий.

На рис. 6—9 показана долговременная эволюция распределения плотности фрагментов по долготе после взрыва КА типа Экран-2 [7]. Интересно, что взрыв произошел около точки либрации с долготой 75° . В первые 15 суток около этой точки плотность фрагментов максимальна. Затем происходит перераспределение фрагментов и они концентрируются около обеих точек либрации с долготами 75° и 255° . Это в какой-то мере подтверждает результаты, приведенные в работе [8]. В дальнейшем избыток около второй точки либрации сохраняется на больших интервалах времени, несмотря на действие возмущений от Луны, Солнца и светового давления. Фрагменты КА

Титан III Транстейдж (рис. 10, 11) также дают избыточную плотность распределения около точки либрации с долготой 255° . Такую же картину дает распределение в пространстве неуправляемых геосинхронных объектов (<http://lfvn.astronomer.ru/report>).

Далее на рис. 12 и 13 в проекции на орбитальную плоскость показана орбитальная эволюция фрагментов двух КА Cosmos 862 и Cosmos 1317 до полного выгорания всех фрагментов. Выгорание фрагментов КА Космос 862 произошло за 800 суток, а фрагментов КА Космос 1317 — за 1100. Для оценки использована упрощенная экспоненциальная модель атмосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-17043).

Список литературы

1. *Klinkrad H.* Space debris. Springer. 2006. 430 p.
2. *Reynolds R. C.* Review of current asteroids to model and measure the orbital debris environment in low-earth orbit // *Adv. Space Res.* 1990. Vol. 10, № 3–4. P. 359–371.
3. *Pardini C., Anselmo L., Rossi A. et al.* The 1997.0 ISTI Orbital Debris Reference Model // *AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, Monterey, CA, USA, 9–11 Feb. 1998. P. 1–17. (Html version).
4. *Бордовицына Т. В., Дружинина И. В.* Комплекс программ для определения динамических параметров потока частиц, образовавшихся в результате распада объекта на орбите // *Астрономия и геодезия*. Томск: Изд-во ТГУ. Вып. 16. 1998. С. 58–67.
5. *Головкина А. Г.* Исследование по данным наблюдений численной модели образования космического мусора в результате взрывов КА на орбитах // *Фундаментальные и прикладные проблемы механики: Материалы Пятой Всерос. конф.*, Томск, окт. 2006 г. Томск: Изд-во ТГУ, 2006.
6. *Рыхлова Л. В.* Засоренность околоземного пространства объектами техногенного происхождения // *Околоземная астрономия - 2003: Тр. конф. Терскол, сент. 2003 г. / Ин-т астрономии РАН*. СПб.: ВВМ, 2003. Т. 2. С. 11–19.
7. *Бордовицына Т. В., Батулин А. П., Васильева П. В., Головкина А. Г.* Структура и эволюция комплекса фрагментов космического мусора, образовавшегося в результате распада космических

аппаратов на орбитах // Фундаментальные и прикладные проблемы механики: Материалы Пятой Всерос. конф., Томск, окт. 2006 г. Томск: Изд-во ТГУ. 2006.

8. Кузнецов Э. Д., Гламазда Д. В. Динамическая эволюция частиц, образовавшихся в результате взрыва объекта на геостационарной орбите // Околоземная астрономия - 2003: Тр. конф., Терскол, сент. 2003 г. / Ин-т астрономии РАН. СПб.: ВВМ, 2003. Т. 2. С. 52–59.

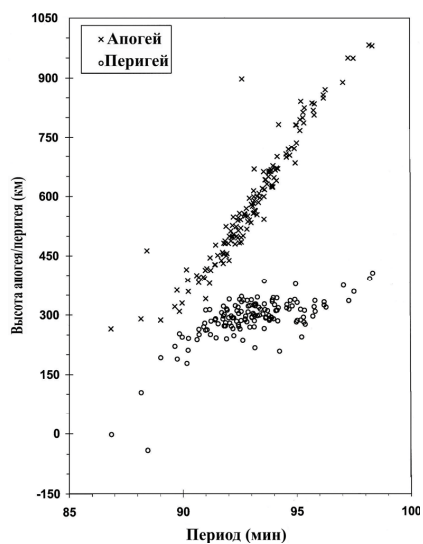


Рис. 1. Cosmos 1405, данные наблюдений

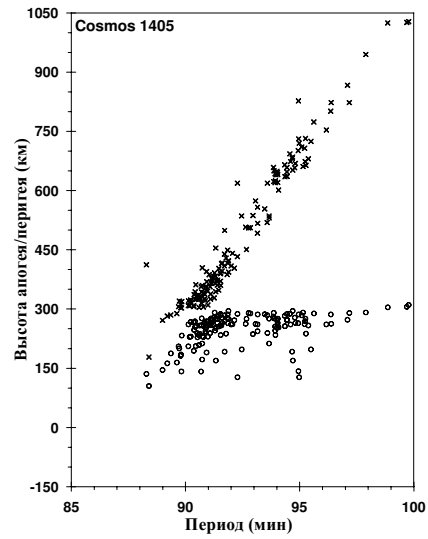


Рис. 2. Cosmos 1405, данные моделирования

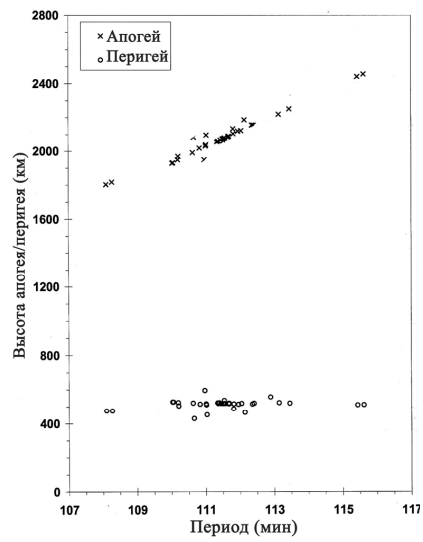


Рис. 3. Cosmos 375, данные наблюдений

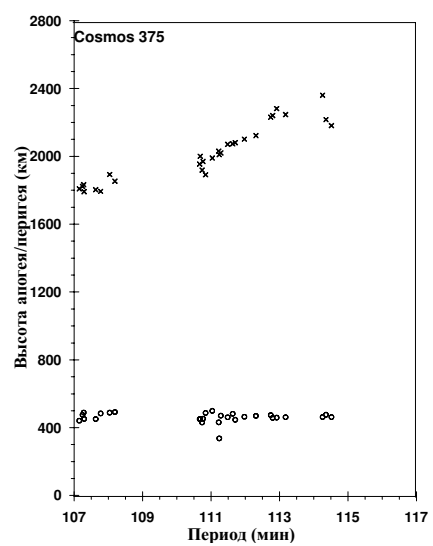


Рис. 4. Cosmos 375, данные моделирования

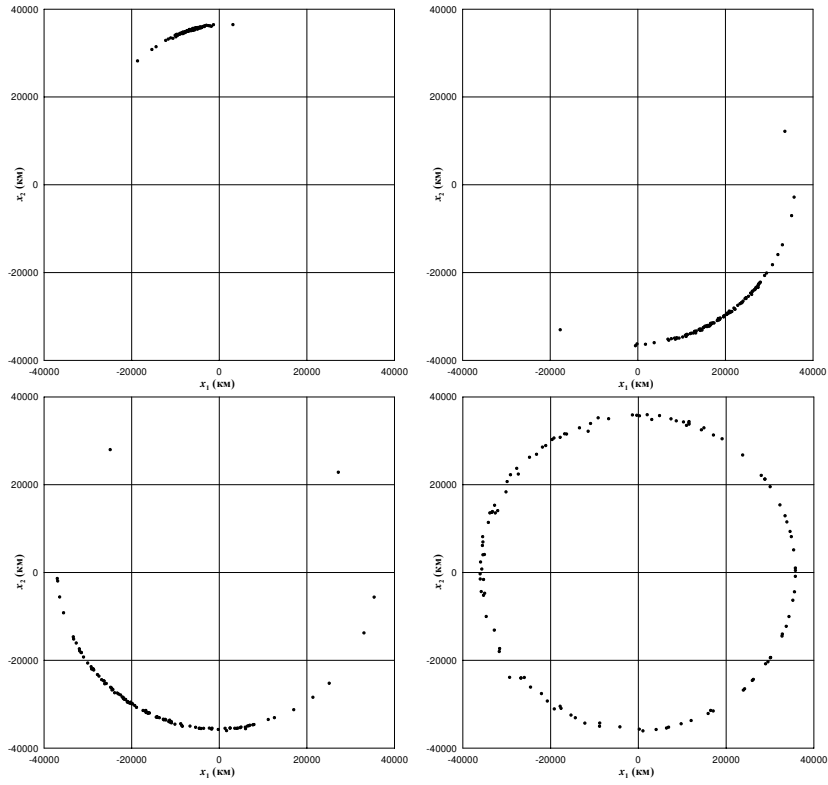


Рис. 5. Экран-2. Образование тора фрагментов: 1 сутки, 3 суток, 6 суток и 1 год

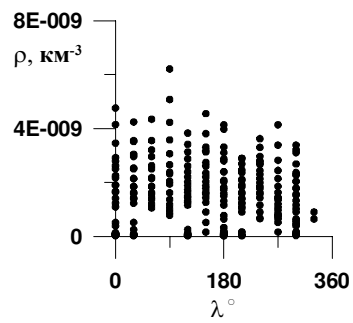


Рис. 6. Экран-2. Распределение плотности фрагментов через 15 суток после взрыва

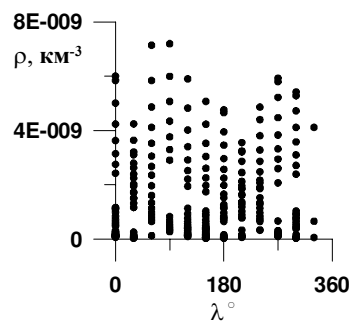


Рис. 7. Экран-2. Распределение плотности фрагментов через 180 суток после взрыва

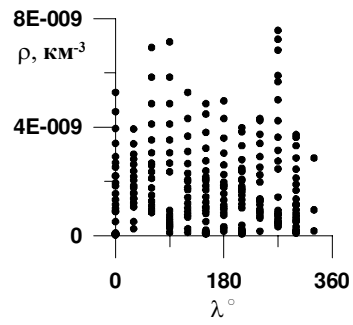


Рис. 8. Экран-2. Распределение плотности фрагментов через 365 суток после взрыва

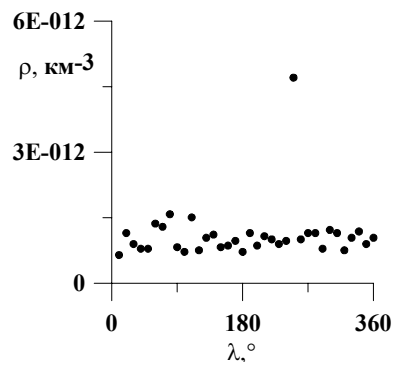


Рис. 9. Экран-2. Распределение плотности фрагментов через 25 лет после взрыва

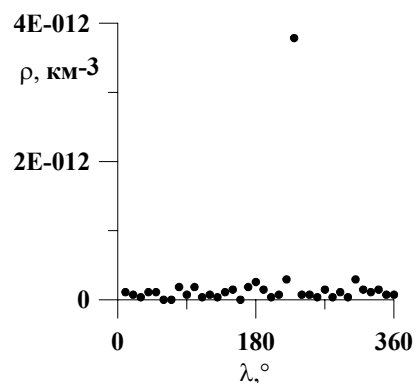


Рис. 10. Титан III Транстейдж. Распределение плотности фрагментов через год после взрыва

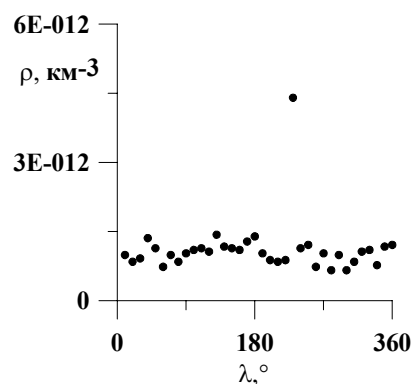


Рис. 11. Титан III Транстейдж. Распределение плотности фрагментов через 14 лет после взрыва

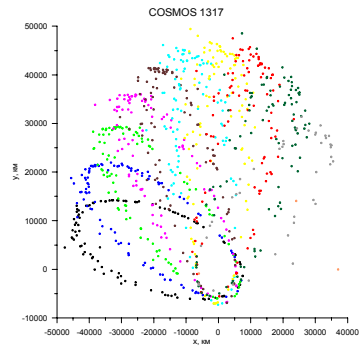


Рис. 12. Орбитальная эволюция фрагментов КА COSMOS-1317 от момента взрыва до полного выгорания

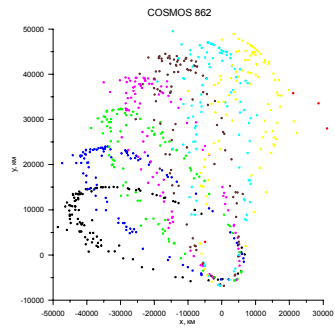


Рис. 13. Орбитальная эволюция фрагментов КА COSMOS-862 от момента взрыва до полного выгорания

ПРОТОПЛАНЕТНЫЕ ДИСКИ

В лекции рассматриваются современные представления о строении и эволюции протопланетных дисков. Наблюдения процесса планетообразования начались с исследований особого класса переменных звезд — звезд типа Т Тельца. Хотя представления о том, что планеты образуются в газопылевых дисках, высказывались уже в XVIII в., прямые доказательства существования таких дисков у других звезд были получены лишь в 90-е гг. XX в. Пока вся информация о возможном образовании планет в околозвездных дисках является косвенной, но не исключено, что прямые свидетельства будут получены с помощью астрономических инструментов следующих поколений.

The lecture contains a review of the current ideas on the structure and evolution of protoplanetary disks. Observations of the planet formation have been initiated by the studies of the special kind of variable stars, namely, T Tauri stars. Even though suggestion on the planet formation in gas-dust disks had been put forward back in 18th century, direct proofs of the circumstellar disks' existence have been obtained only in 1990-ies. Till now all the information on the possible planet formation in circumstellar disks is circumstantial, however, it is quite possible that direct evidence will be obtained with the next generation of astronomical tools.

Звезды типа Т Тельца

Диски вокруг молодых звезд практически неизменно называют сейчас протопланетными, хотя в этом есть определенное лукавство — *прямых* свидетельств того, что планеты образуются именно в этих дисках, у нас пока нет. Зато косвенных доказательств много, и самое убедительное из них находится у нас буквально под боком. Вращение планет Солнечной системы в одном направлении и почти в

одной плоскости говорит о том, что вещество, из которого они образовались, было распределено вокруг Солнца именно в виде плоского вращающегося диска. На протяжении последних столетий высказывались различные предположения о природе этого вещества — происходит из того же облака, из которого образовалось Солнце (Кант—Лаплас), захвачено Солнцем (Шмидт), выброшено из Солнца (Джинс).

Открытия последних десятилетий убедительно свидетельствуют в пользу первой из трех этих гипотез. Стартовой точкой этих исследований можно считать работу Джоя [1], в которой он впервые выделил в качестве отдельного класса переменные звезды типа Т Тельца. Характерной спектральной особенностью этих звезд оказались сильные эмиссионные линии (в частности, водорода) и значительные «инфракрасные избытки» — избыточное излучение в ближней ИК-области спектра, указывающее на наличие возле звезды горячей пыли. Звезды типа Т Тельца относятся к поздним спектральным классам (G, K, M). В области ранних классов им родственны Ae/Be-звезды Хербига — более массивные и горячие.

Поскольку звездами типа Т Тельца и Ae/Be Хербига населены области звездообразования, логично предположить, что эти объекты молоды, а окружающая их пыль принадлежит к остаткам вещества, из которого они образовались. Собственно говоря, именно динамическая неустойчивость ассоциаций звезд типа Т Тельца (Т-ассоциаций) привела В. А. Амбарцумяна к выводу о продолжающемся звездообразовании в Галактике. Спектроскопические наблюдения — сначала ИК-полос молекулы CO, а затем и субмиллиметровых линий других молекул — показали, что вещество вокруг молодых звезд вращается, причем в большинстве случаев по кеплеровским орбитам. Наконец, появление космических телескопов позволило получить прямые изображения околосветных дисков. Также в последние годы выяснилось, что диски есть не только у звезд, но и у коричневых карликов (см., напр., [2]). Сейчас их наблюдения ведутся в самых разных диапазонах — от субмиллиметрового до рентгеновского.

По современным представлениям, переменные типа Т Тельца — это звезды с массой менее $2 M_{\odot}$, еще не вышедшие на главную последовательность диаграммы Герцшпрунга—Рессела. Помимо «классических» звезд типа Т Тельца (classic T Tau stars, CTTS) выделяют также звезды типа Т Тельца «со слабыми линиями» (weak-line T Tau stars, WTTS). Они занимают на диаграмме Герцшпрунга—Рессела то же положение, что и классические звезды, но эмиссионные линии в

них слабы или совсем отсутствуют. Окружающие их диски имеют размеры от десятков до сотен астрономических единиц и массы порядка нескольких сотых масс Солнца.

Перераспределение углового момента

С теоретической точки зрения в наличии дисков у молодых звездных объектов нет ничего удивительного. Дозвездные ядра вращаются, причем типичный угловой момент такого ядра на несколько порядков превышает угловой момент звезды. Если бы во время коллапса с угловым моментом ничего не происходило, звезды вообще не образовывались бы из-за центробежного барьера. Численное моделирование показывает, что в процессе сжатия вращающееся облако фрагментирует, переводя избыточный угловой момент в орбитальное движение фрагментов и во вращающиеся вокруг них диски.

Основная масса молодой звезды накапливается на этом этапе, однако вещество продолжает падать на нее и на этапе существования диска. Именно с аккрецией вещества связывают основные характеристики звезд Т Тельца — эмиссионные линии [3].

Поскольку аккреция происходит в диске, проблема перераспределения углового момента встает с новой остротой: чтобы вещество могло приблизиться к звезде, оно должно тормозиться, переходя на более низкие орбиты. Основным претендентом на роль тормозящей силы в аккреционных дисках является турбулентная вязкость [4, 5], однако механизм возбуждения турбулентности пока неясен.

Одним из основных претендентов на роль причины возникновения турбулентности в протопланетных дисках считается сейчас магниторотационная неустойчивость. Чтобы она действовала, вещество должно быть ионизовано. Поскольку вязкая диссипация нагревает диск до высоких температур лишь вблизи звезды, в большей его части тепловая ионизация отсутствует.

Это считалось доводом против объяснения вязкости в протопланетных дисках магниторотационной неустойчивостью. Однако в 1996 г. Гамми [6] предположил, что в приповерхностных областях диска действуют нетепловые механизмы ионизации — ионизация космическими лучами, а также ультрафиолетовым и рентгеновским излучением молодой звезды.

В таком диске аккреция является «слоевой» — диск разделяется на поверхностный «активный слой», где турбулентная вязкость обеспечивает возможность течения вещества к звезде, и срединную (по

вертикали) «мертвую зону», куда не проникают ни космические лучи, ни УФ-излучение и где вещество потому практически нейтрально. «Мертвая зона» охватывает не всю срединную область диска, а только ее внутреннюю часть — на расстояниях до нескольких астрономических единиц от звезды. Поскольку в Солнечной системе это пространство занято планетами земной группы, можно предположить, что различие между ними и планетами-гигантами в какой-то степени связано с эффектом «мертвой зоны». Однако это предположение нуждается в очень основательной проверке, тем более, что, как показывает численное моделирование, взаимодействие «мертвой зоны» с активным слоем возбуждает в ней хаотические движения, так что даже в срединной области диска также должна присутствовать ненулевая эффективная вязкость.

Строение протопланетных дисков

Спектр классической звезды типа Т Тельца представляет собой сумму спектров звезды и диска. Попытки объяснить этот спектр излучением плоского диска не увенчались успехом: они предсказывали слишком крутое спадание спектра с увеличением длины волны. Выход был найден Кенионом и Хартманном [7], которые предположили, что околозвездные диски являются не плоскими, а «расходящимися» (flaring). Такая конфигурация (см. рисунок) позволяет диску эффективно перехватывать излучение звезды. Дополнительный источник нагрева «уплощает» спектр диска, поскольку увеличивает количество теплой пыли в диске на больших расстояниях от его центра. Оценки и модели показывают, что этот источник нагрева весьма эффективен и уступает аккреционному нагреву лишь при темпе аккреции выше $10^{-8} M_{\odot}$ в год. Поэтому использовать температуру пыли для оценки темпа аккреции не удастся.

В качестве индикатора скорости аккреции используются эмиссионные линии — в предположении, что они рождаются в том месте, где вещество диска падает на звезду. Оцененные таким образом скорости аккреции варьируются примерно от 10^{-9} до $10^{-7} M_{\odot}$ в год, причем обнаруживают тенденцию к убыванию с возрастом звезды [8]. Очевидно, что эти значения слишком малы, чтобы играть важную роль в эволюции массы звезды. Характерная продолжительность стадии Т Тельца не превышает нескольких миллионов лет. За это время на звезду аккрецируется всего порядка $0.01 M_{\odot}$ вещества. Очевидно, что либо к началу стадии Т Тельца звезда уже практи-

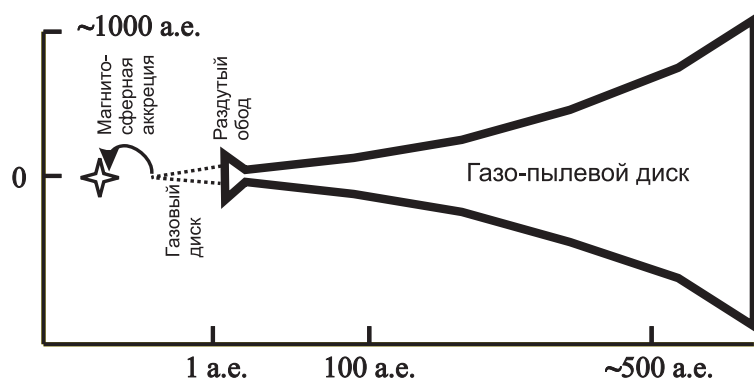


Рис. 1. Структура расходящегося протопланетного диска. Оси нарисованы не в масштабе. В центре диска температура, обеспечиваемая вязкой диссипацией, превышает температуру испарения пыли, и диск становится чисто газовым. В непосредственных окрестностях звезды дисковая картина аккреции нарушается магнитным полем — вещество начинает течь вдоль магнитных силовых линий и попадает на звезды вблизи магнитных полюсов (так называемая магнитосферная аккреция)

чески полностью сформирована, либо периоды «стационарной» аккреции чередуются с кратковременными эпизодами гораздо более мощного течения вещества.

Предполагается, что такие эпизоды могут объяснять вспышки звезд FU Ориона. Повышение их яркости соответствует возможному скачкообразному росту темпа аккреции до $10^{-4} M_{\odot}$. Правда, звезд типа FU Ориона наблюдается слишком мало. Если их наблюдаемое количество пересчитать в частоту эпизодов усиленной аккреции, их также недостаточно для объяснения звездных масс. Однако не исключено, что значительная доля вспышек типа FU Ориона остается незамеченной из-за высокого поглощения в областях звездообразования.

Несмотря на возможную сильную переменность темпа аккреции в протопланетных дисках, для их описания широко используются стационарные модели — как с учетом вязкого нагрева (активные диски), так и без него, с учетом только нагрева излучением звезды (пассивные диски). Основу большинства этих моделей составляет так называемое приближение 1+1D: вертикальная структура диска на каждом радиусе считается независимо от других радиусов в при-

ближении плоскопараллельного слоя и в предположении, что вертикальное распределение вещества определяется условием гидростатического равновесия [9–11]. Для нахождения распределения температуры по высоте над плоскостью диска решается уравнение переноса излучения в вертикальном направлении, как правило, в диффузионном приближении. Чтобы такое описание диска было справедливым, он должен быть оптически толстым и геометрически тонким. Оба условия на практике выполняются далеко не всегда: вблизи поверхности диск не является оптически толстым, далеко от звезды он не является геометрически тонким (толщина периферийных областей «расходящегося диска» может превышать расстояние до звезды).

Тем не менее пока с помощью этих моделей удастся успешно воспроизводить спектры большинства известных протопланетных дисков. Но по мере повышения разрешающей силы телескопов это согласие может нарушиться. Поскольку при моделировании переноса излучения в дисках основным источником непрозрачности считается пыль, результаты расчетов довольно существенно зависят от ее оптических свойств, принятых в модели. Кроме того, теоретическая структура дисков довольно сильно зависит от принятой методики расчета переноса излучения. Например, Дюллемонд и др. [12] показали, что использование различных методов решения уравнения переноса приводит к различиям в температурной структуре дисков, достигающим 70 %. Интересно, что эти различия практически не сказываются на форме общего спектра диска, однако они, вероятно, проявятся при спектроскопических наблюдениях дисков с более высоким угловым разрешением.

Будущие наблюдения должны также прояснить строение центральных областей дисков. Эти области привлекают к себе большой интерес по нескольким причинам. Во-первых, это именно тот диапазон расстояний, в котором в Солнечной системе образовались планеты земной группы. Во-вторых, именно здесь происходит завершающий этап аккреции — выпадение вещества диска на звезду. Строение центра протопланетного диска, вероятно, довольно сложно. В этой области температура превышает температуру испарения пыли (примерно 1000–1500 К), поэтому диск состоит только из газа, и непрозрачность его существенно понижается. В пылевом диске возникает центральная «дырка», оценить размеры которой с помощью интерферометрических наблюдений можно уже сейчас. Внутренний край пылевого диска освещается звездой не под косым углом, как в большей части диска, а практически перпендикулярно. В резуль-

тате эффективного поглощения излучения и сильного нагрева внутренних «обод» диска расширяется и в диске появляется утолщение (puffed rim) [13]. Это утолщение может затенять часть диска, расположенную непосредственно за ним, диск там будет не таким горячим, как за пределами тени, что приведет к еще большему усложнению его структуры.

Химическая структура дисков

Наблюдения молекулярных линий значительно более информативны, чем наблюдения излучения пыли, поскольку позволяют восстановить не только плотность и температуру, но и поле скоростей. Однако для интерпретации спектральных наблюдений необходима адекватная модель химической структуры диска. В основном при ее построении предполагается, что диск является стационарным. Характерной чертой практически всех химических моделей дисков является их слоистая структура. Холодная срединная область обеднена молекулами, поскольку все они выморожены на пыли. Внешняя атмосфера диска обеднена молекулами, поскольку их диссоциирует ультрафиолетовое и рентгеновское излучение молодой звезды. Между недрами диска и его атмосферой расположен «теплый молекулярный слой» [14], в котором должны быть сосредоточены все наблюдаемые молекулы.

В общем, пока можно сказать, что эта картина согласуется с наблюдательными данными, однако нужно учитывать, что хоть сколько-нибудь детальную химическую структуру дисков наблюдения пока построить не позволяют. В тех редких случаях, когда это все-таки удастся сделать, иногда возникают противоречия, объяснить которые в рамках стационарных представлений не удастся. Одно из таких противоречий было отмечено Дартуа и др. [15]. Авторы этой работы выяснили, что в диске звезды DM Тельца значительная доля излучения в линиях изотопомеров молекулы CO приходит из областей с температурами ниже 20 К, т. е., оттуда, где, согласно химическим моделям, CO в газовой фазе находиться не может. Другая странность протопланетных дисков заключена в структуре пылинок. Детали в спектрах дисков свидетельствуют, что значительная доля пыли в них кристаллизована [16]. Однако кристаллизация вещества

пылинок происходит лишь при очень высоких температурах, характерных для самых центров дисков, тогда как кристаллические пылинки наблюдаются и в значительно более холодных областях (скажанное относится не только к другим протопланетным дискам, но и к нашей Солнечной системе).

Возможно, решение этих загадок следует искать в явлениях перемешивания. Поскольку на самом деле в дисках имеются как глобальные движения (часть вещества движется к звезде, часть удаляется от нее, унося угловой момент), так и локальные турбулентные движения, логично предположить, что эти движения как-то скажутся на химической структуре дисков. Пока имеется лишь несколько моделей перемешивания в дисках [17–20], и в них, как правило, рассматривается либо только вертикальное, либо только радиальное перемешивание. Однако уже эти модели свидетельствуют, что перенос вещества играет в эволюции содержания ряда молекул (в частности, углеродных цепочек) определяющую роль.

Поздняя эволюция дисков

Подсчеты звезд с дисками в молодых скоплениях различных возрастов говорят о том, что с возрастом доля звезд с дисками заметно снижается. В скоплениях старше 10 млн лет их уже практически нет. Это означает, что за несколько миллионов лет диски полностью диссипируют. Это может быть связано с их фотоиспарением (под воздействием излучения как окружающих звезд, так и самой родительской звезды) или с приливным воздействием компаньонов двойных систем. Однако более интересная гипотеза связывает исчезновение дисков с образованием планетных систем.

Пока все признаки протекания этого процесса остаются косвенными. Прежде всего, нужно отметить, что сейчас имеется уже немало наблюдательных подтверждений того, что в дисках большого возраста увеличивается характерный размер пылинок [21]. Это согласуется с представлением о том, что образование планет начинается со слипания пылинок и их постепенного превращения в более крупные тела.

Модели структуры протопланетных дисков предсказывают радиус центральной «дырки» в пылевом диске (связанной с испарением пыли) не более 1 а. е., однако наблюдения свидетельствуют, что в некоторых дисках радиус «беспылевого» пространства достигает десятков а. е. Именно так должны выглядеть диски, часть простран-

ства в которых расчищена тяготением образовавшихся в диске планет. В некоторых дисках имеются детали структуры — спиральные ветви, вторичные диски, которые также могут быть порождены тяготением планет.

В этом отношении большие надежды также возлагаются на телескопы будущего, в частности на ALMA и SKA. Предполагается, что эти инструменты хотя и не позволят непосредственно наблюдать планеты, но уверенно выявят, например, пустые кольцеобразные «щели», расчищенные планетами, или излучение, связанное с аккрецией вещества на образующуюся планету.

Работа проведена при поддержке грантов РФФИ 07-02-01031 и Президента РФ НШ-4820.2006.02.

Список литературы

1. Joy A. H. T Tauri variable stars // *Astrophys. J.* 1945. Vol. 102. P. 168.
2. Gatti T., Testi L., Natta A. et al. Accretion in ρ Ophiuchus brown dwarfs: infrared hydrogen line ratios // *Astron. Astroph.* 2006. Vol. 460. P. 547.
3. Kurosawa R., Harries T. J., Symington N. H. On the formation of H α line emission around classical T Tauri stars // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2006. Vol. 370. P. 580.
4. Shakura N. I., Sunyaev R. A. Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. Astroph.* 1973. Vol. 24. P. 337.
5. Lynden-Bell D., Pringle J. E. The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1974. Vol. 168. P. 603.
6. Gammie Ch. F. Layered accretion in T Tauri disks // *Astrophys. J.* 1996. Vol. 457. P. 355.
7. Kenyon S. J., Hartmann L. Spectral energy distributions of T Tauri stars: disk flaring and limits on accretion // *Ibid.* 1987. Vol. 323. P. 714.
8. Hartmann L., Calvet N., Gullbring E., D'Alessio P. Accretion and the evolution of T Tauri disks // *Ibid.* 1998. Vol. 495. P. 385.
9. Chiang E. I., Goldreich P. Spectral energy distributions of T Tauri stars with passive circumstellar disks // *Ibid.* 1997. Vol. 490. P. 368.

10. *D'Alessio P., Canto J. et al.* Accretion disks around young objects. I. The detailed vertical structure // *Astrophys. J.* 1998. Vol. 500. P. 411.
11. *Dullemond C. P., Dominik C., Natta A.* Passive irradiated circumstellar disks with an inner hole // *Ibid.* 2001. Vol. 560. P. 957.
12. *Dullemond C. P., van Zadelhoff G. J., Natta A.* Vertical structure models of T Tauri and Herbig Ae/Be disks // *Astron. Astroph.* 2002. Vol. 389. P. 464.
13. *Isella A., Natta A.* The shape of the inner rim in proto-planetary disks // *Ibid.* 2006. Vol. 438. P. 899.
14. *Aikawa Y., van Zadelhoff G. J., van Dishoeck E. F. et al.* *Ibid.* 2002. Vol. 386. P. 622.
15. *Dartois E., Dutrey A., Guilloteau S.* Structure of the DM Tau Outer Disk: Probing the vertical kinetic temperature gradient // *Ibid.* 2003. Vol. 399. P. 773.
16. *Bockelée-Morvan D., Gautier D., Hersant F. et al.* Turbulent radial mixing in the solar nebula as the source of crystalline silicates in comets // *Ibid.* 2002. Vol. 384. P. 1107.
17. *Gail H.-P.* Radial mixing in protoplanetary accretion disks. I. Stationary disc models with annealing and carbon combustion // *Ibid.* 2001. Vol. 378. P. 192.
18. *Willacy K., Langer W., Allen M. et al.* Turbulence-driven diffusion in protoplanetary disks: chemical effects in the outer regions // *Astrophys. J.* 2006. Vol. 644. P. 1202.
19. *Ilgner M., Nelson R. P.* On the ionisation fraction in protoplanetary disks. II. The effect of turbulent mixing on gas-phase chemistry // *Astron. Astroph.* 2006. Vol. 445. P. 223.
20. *Semenov D., Wiebe D., Henning Th.* Gas-phase CO in protoplanetary disks: a challenge for turbulent mixing // *Astrophys. J. Let.* 2006. Vol. 647. P. L57.
21. *Rodmann J., Henning Th., Chandler C. J. et al.* Large dust particles in disks around T Tauri stars // *Astron. Astroph.* 2006. Vol. 446. P. 211.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ ГАЛАКТИК: ЦЕЛИ И МЕТОДЫ

Поверхностная фотометрия является одним из наиболее информативных и широко распространенных методов исследования галактик. В обзоре мы показываем, какие современные проблемы физики галактик можно решить с помощью фотометрических исследований. Большое внимание уделено методам анализа данных поверхностной фотометрии: декомпозиции излучения галактик, исследованию с помощью двухцветных диаграмм, моделированию состава звездного населения. Обсуждаются некоторые нерешенные вопросы внегалактической астрономии, поставленные результатами фотометрических исследований.

Surface photometry is one of the most informative and widespread methods of research of galaxies. In the review we show, what modern problems of physics of galaxies can be solved by means of photometric researches. The big attention is given to methods of the analysis of surface photometry data: decomposition of radiation of galaxies, to research by means of two-color diagrams, to modelling of content of the stellar population. Some unresolved problems of extragalactic astronomy put by results of photometric researches are discussed.

Введение

Поверхностная фотометрия была и остается одним из главных источников информации (зачастую — единственным) о протяженных объектах: галактиках, газовых туманностях, шаровых скоплениях и др. Она позволяет нам получить информацию о распределении яркости и цвета по поверхности объекта. Получение и обработка данных поверхностной фотометрии является достаточно сложной задачей и развивается вместе с усовершенствованием телескопов, приемной аппаратуры и средств обработки данных (в последние 20 лет — компьютеров и программного обеспечения).

История развития метода

Первой работой, в которой использовался метод поверхностной фотометрии, является исследование Рейнольдсом [1] Туманности Андромеды. Статья [1] вышла в 1913 г., т. е. еще до того, как стала известна природа М31. Массовое изучение галактик методами поверхностной фотометрии началось в 50-е гг. XX в с вводом в строй крупных телескопов и в связи с успехами в создании высокочувствительных фотоэмульсий.

До появления вычислительных машин поверхностная фотометрия являлась одной из наиболее сложных и трудоемких задач наблюдательной астрофизики, поэтому с появлением мощных ЭВМ метод в 70—80-е гг. прошлого века становится основным, наиболее популярным и информативным способом получения информации о галактиках. В 80-е гг. на смену фотопластинкам приходят ПЗС-приемники, развивается программное обеспечение: появляются пакет программ PCVISTA (работающий под ОС DOS), затем — системы обработки изображений IRAF и MIDAS (ОС Linux). Именно в те годы были созданы применяемые сейчас методики наблюдений, калибровки и обработки изображений протяженных объектов.

Современное состояние и задачи метода поверхностной фотометрии

С появлением в последние 10—15 лет новых, еще более крупных телескопов и усовершенствованием приемной аппаратуры удельный вес работ по изучению галактик, сделанных методом поверхностной фотометрии, уменьшился. Чувствительность и разрешающая способность современных астрономических инструментов позволяет в настоящее время проводить спектроскопические исследования слабых удаленных объектов и звездную (!) фотометрию внешних областей галактик Местной Группы. Оба метода являются более точными и информативными, чем данные поверхностной фотометрии.

Означает ли это, что мы должны отказаться от проведения поверхностной фотометрии галактик? Нет. Во-первых, есть огромное количество неисследованных фотометрически галактик, достаточно слабых и удаленных для изучения их методами звездной фотометрии и спектроскопии. Как будет показано ниже, результаты поверхност-

ной фотометрии позволяют не только получить достаточно много новой информации о галактиках, но и ставят новые вопросы перед исследователями.

Во-вторых, для российских астрономов, сильно отставших в развитии технической базы, получить доступ к зарубежным современным приборам и инструментам для проведения наблюдений довольно затруднительно. В России лишь 6-метровый телескоп САО РАН позволяет получать спектроскопический наблюдательный материал мирового уровня. Фотометрические данные для слабых объектов с высоким угловым разрешением на территории России и СНГ получить в настоящее время невозможно. Однако телескопы и приемная аппаратура, установленные на обсерваториях России и СНГ, позволяют получать данные и исследовать галактики методом поверхностной фотометрии.

Имеется целый ряд актуальных задач внегалактической астрономии, которые невозможно решить без знаний о распределении яркости и цвета в галактиках (т. е. без информации, получаемой методом поверхностной фотометрии). Нобелевский лауреат В. Л. Гинзбург выделил в 1992 г. ряд наиболее важных и интересных проблем физики и астрофизики [2]. Одна из восьми астрофизических проблем посвящена вопросам внегалактической астрономии: «квазары и ядра галактик; образование галактик; проблема скрытой массы (темной материи) и ее детектирования». Решение как минимум двух из трех задач, сформулированных В. Л. Гинзбургом, невозможно без данных поверхностной фотометрии галактик.

Декомпозиция излучения галактик, поиск скрытой массы

Любой протяженный объект описывается в рамках поверхностной фотометрии функцией $I(r, \phi)$ или $\mu(r, \phi)$, где I — поток излучения; μ — поверхностная яркость (измеряемая обычно в звездных величинах на квадратную секунду дуги) в точке с координатами (r, ϕ) ; r — расстояние и ϕ — азимут точки, отсчитываемые от центра галактики. Величины I и μ связаны между собой законом Погсона: $\mu = -2.5 \lg I + \text{const}$.

Одним из важнейших свойств галактики является усредненное по азимуту распределение яркости $I(r)$. Усреднение по ϕ производится в эллиптических апертурах с учетом наклона галактики. Важным параметром является эффективный радиус r_e — радиус большой оси

галактики, внутри которого излучается половина полной светимости галактики: $L_e = 0.5L_{total}$, где

$$L_{total} = 2\pi \int_0^{\infty} I(r) r dr.$$

Важнейшей характеристикой галактик является отношение светимостей (масс, размеров) двух основных компонент: плоского (диска) и сферического (балджа). На этом соотношении основана хаббловская морфологическая последовательность галактик, имеющая глубокий физический смысл. Диски галактик образованы более молодыми звездами, доля плоского компонента увеличивается при переходе от линзовидных (S0) к спиральным галактикам позднего типа. В эллиптических галактиках диск, как правило, отсутствует. Разложение функции $I(r)$ на распределение яркости диска и балджа (иногда — и бара) называется декомпозицией. В общем случае для одномерной декомпозиции

$$I(r) = I(r)_{disk} + I(r)_{bulge}.$$

Распределение яркости в дисках аппроксимируется экспоненциальным законом

$$I(r)_{disk} = I_{0,disk} \exp(-r/h)$$

или

$$\mu(r)_{disk} = \mu_{0,disk} + 1.086r/h,$$

где I_0 , μ_0 — яркость в центре диска; h — шкала падения яркости диска. Распределение яркости в балджах аппроксимируется законом Серсика [3]:

$$I(r)_{bulge} = I_{0,bulge} \exp(-(r/r_0)^{1/n}),$$

где n обычно равно от 1 до 5, причем при $n = 4$ формула Серсика переходит в частный случай — формулу Вокулера, которой удовлетворяет распределение излучения в большинстве балджей галактик. При $n = 4$

$$\mu(r)_{bulge} = \mu_{0,bulge} + 8.325(r/r_e)^{1/4},$$

где r_e — эффективный радиус балджа.

Отметим, что значение параметра n , по-видимому, коррелирует с физическими характеристиками балджа: чем меньше значение n ,

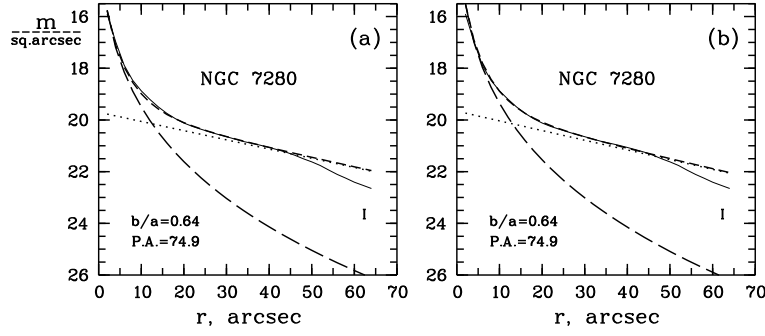


Рис. 1. Усредненные фотометрические профили галактики NGC 7280 (в зв. вел./кв. с дуги) в фильтре I (непрерывные линии). Показаны модельные профили балджа (длинный пунктир), диска (точки) и суммарные модельные профили (короткий пунктир) для двухмерной (а) и одномерной декомпозиции (б)

тем моложе звездное население балджа. При $n = 1$ в галактиках фактически наблюдается второй внутренний диск, населенный относительно молодыми звездами. Такие диски, как звездные, так и газовые, в последнее время действительно обнаружены в большом количестве, причем их наклон часто не совпадает с наклоном основного диска галактики (см., например, [4]).

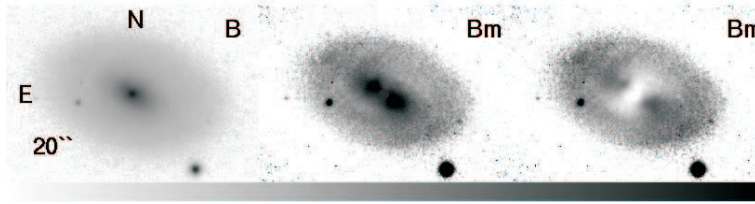


Рис. 2. Изображение NGC 7280 в фильтре B (слева), «остаточные» изображения B_m при двухмерной (в центре) и одномерной декомпозиции (справа). Диапазон значений (от черного цвета к белому): $B = 26^m/\text{кв. с}$ — $17^m/\text{кв. с}$, $B_m = 0.75^m/\text{кв. с}$ — $-0.75^m/\text{кв. с}$

Декомпозиция излучения галактик по усредненным профилям — одномерная декомпозиция — при наличии бара, развитой спиральной структуры, любых неосесимметричных компонент дает некор-

ректные результаты. В качестве примера на рис. 1, 2 показаны результаты полученной в [5] одно- и двухмерной декомпозиции SB0-галактики NGC 7280. Правые график и рисунок построены по результатам одномерной декомпозиции. Видно, как в области бара на расстоянии 7—20 угл. с от центра галактики усредненный по азимуту профиль «размывает» излучение бара по эллипсу. В то же время на рис. 1 а усредненный профиль яркости на тех же расстояниях не совпадает с суммарной модельной яркостью балджа и диска.

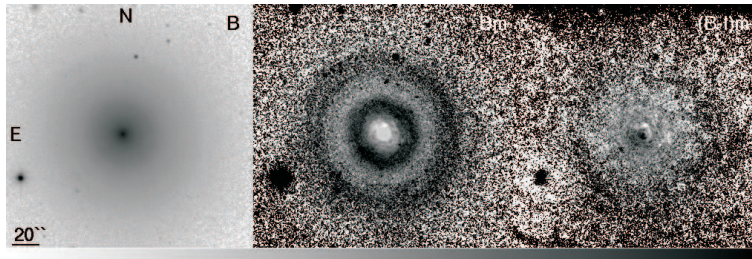


Рис. 3. Изображение NGC 524 в фильтре B (слева), «остаточное» изображение B_m (в центре) и карта «остаточного» показателя цвета $(B - I)_m$ (справа). Диапазон значений (от черного цвета к белому): $B = 27^m/\text{кв. с} - 17^m/\text{кв. с}$, $B_m = 0.2^m/\text{кв. с} - -0.2^m/\text{кв. с}$, $(B - I)_m = 0.1^m - -0.1^m$. Указан масштаб изображений

Применяя при проведении двухмерной декомпозиции излучения метод «маски», заключающийся в вычитании из реального изображения галактики $\mu_{obs}(x, y)$ суммы изображений модельных диска и балджа:

$$\mu_m(x, y) = \mu_{obs}(x, y) - \mu_{mod}(x, y),$$

где

$$\mu_{mod}(x, y) = -2.5 \lg(I_{mod}(x, y)) = -2.5 \lg(I_{bulge}(x, y) + I_{disk}(x, y))$$

и x, y — координаты, и анализе полученного «остаточного» изображения $\mu_m(x, y)$, мы не только получаем достоверную информацию о фотометрических параметрах компонент галактики, но и можем исследовать особенности ее структуры. В качестве примера на рис. 3, 4 показаны реальные и «остаточные» изображения и карта цвета S0-галактики NGC 524 и сильно наклонной спиральной галактики NGC 532 соответственно [5]. По «остаточному» изображению

в NGC 524 — гигантской линзовидной галактике — наблюдаются «светлые» и «темные» кольца — радиальные колебания яркости (но не цвета); по «остаточным» изображениям в NGC 532 — области спиральных ветвей, очагов звездообразования и градиент цвета вдоль малой оси галактики, связанный с ее наклоном.

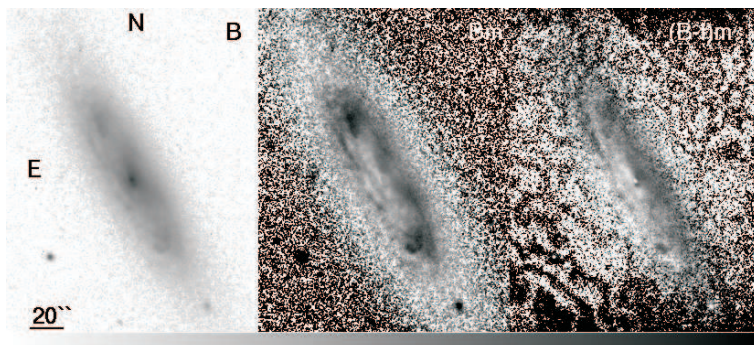


Рис. 4. Изображение NGC 532 в фильтре B (слева), «остаточное» изображение B_m (в центре) и карта «остаточного» показателя цвета $(B-I)_m$ (справа). Диапазон значений (от черного цвета к белому): $B = 26^m/\text{кв. с} - 18^m/\text{кв. с}$, $B_m = 1^m/\text{кв. с} - -1^m/\text{кв. с}$, $(B-I)_m = 0.5^m - -0.5^m$. Указан масштаб изображений

Радиальные колебания яркости (подобные обнаруженным в NGC 524) наблюдаются и в некоторых других линзовидных галактиках. Физические причины подобного распределения яркости (и массы) в S0-галактиках пока не найдены. Это лишь один из примеров вопросов, поднятых благодаря фотометрическим исследованиям. Его решение потребует в том числе и дополнительных фотометрических наблюдений.

Немало открытий преподносит нам и изучение полученных фотометрических параметров компонент галактик. В качестве примера можно привести результат исследования свойств дисков большой выборки галактик (см. [6] и ссылки в ней): в галактиках поздних типов центральная поверхностная яркость их дисков в ИК-диапазоне (и соответственно поверхностная плотность) систематически меньше, чем в галактиках ранних типов, притом что величина центральной поверхностной яркости дисков в «голубой» полосе B не меняется вдоль хаббловской последовательности галактик. В качестве объяснений предложено несколько гипотез: селективное влияние пыли,

большая толщина дисков в галактиках ранних типов, более интенсивное звездообразование в центрах галактик поздних типов и др.; однако, загадка пока не разгадана.

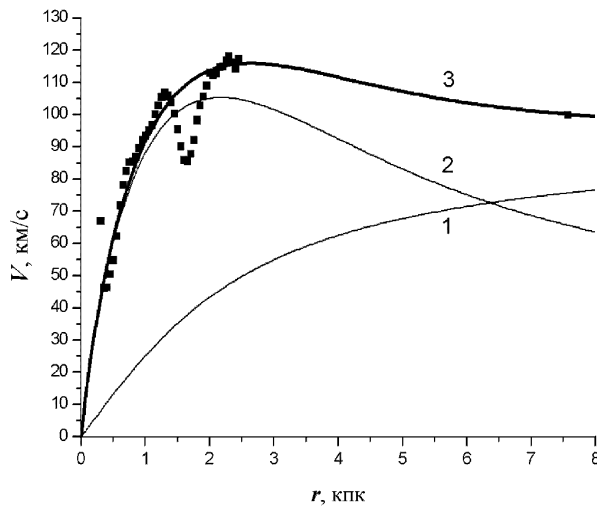


Рис. 5. Кривая вращения NGC 4136 (квадратики). Линии 1 и 2 — составляющие кривой вращения, связанные с диском и темным гало соответственно; 3 — модельная кривая вращения галактики

Рассмотрим теперь методику нахождения скрытой массы в галактиках. Для ее нахождения нам прежде всего надо иметь из спектрометрических наблюдений кривую вращения галактики $V(r)$. В случае сферически симметричного распределения вещества в галактике, а также для абсолютно тонкого (двухмерного) диска полная масса внутри некоторого радиуса r

$$M(r) = V^2(r)r/G.$$

При любом другом распределении вещества в галактике величина $V^2(r)r/G$ является верхним пределом массы внутри данного радиуса.

Теоретически мы могли бы, зная функцию $V(r)$, перейти к распределению плотности в галактике. Такая задача, однако, относит-

ся к числу математически некорректных обратных задач. Обычно поступают наоборот: используя полученные фотометрические параметры строится модель галактики и путем вариации параметров модельная кривая вращения согласуется с наблюдаемой. Как правило, используется трехкомпонентная модель: диск, балдж и темная материя. Фотометрические параметры: шкала падения яркости диска h и эффективный радиус балджа r_e жестко задают функцию распределения вещества диска и балджа в предположении, что поверхностная плотность $\sigma(r) \sim I(r)$ для каждого из компонент. Это справедливо для фотометрических параметров, измеренных в ИК-диапазоне или в полосе I . Подобные ограничения на параметры «видимых» компонент позволяют нам гораздо более корректно определить параметры третьего, невидимого, компонента галактики и измерить его массу внутри некоего радиуса. На рис. 5 приведены кривая вращения и результаты модельных расчетов для галактики NGC 4136 [7].

Исследования с помощью двухцветных диаграмм, начальная функция масс и история звездообразования

В звездной астрономии важнейшим графическим инструментом для описания параметров как отдельных звезд, так и разрешимых на звезды систем (например, рассеянных скоплений) является диаграмма Герцшпрунга—Рассела или «цвет—светимость»). При исследованиях галактик аналогичную роль играют двухцветные диаграммы $U - B - B - V$, $B - V - V - R$, $B - V - V - I$ и т. д. Так же, как и звезды, галактики образуют на двухцветных диаграммах свою главную последовательность — нормальную последовательность интегральных цветов галактик (НПЦ). В зависимости от текущего состава звездного населения галактики и (или) их отдельные части занимают различные области на диаграммах (рис. 6).

В верхней части нормальной последовательности цветов располагаются спиральные галактики позднего типа и неправильные, диски, области спиральных ветвей, т. е. звездные системы, в которых имеется относительно много молодых звезд. В нижней части НПЦ находятся эллиптические галактики, балджи спиральных галактик, шаровые скопления — старые звездные системы, звездообразование в которых давно закончилось. Хаббловская морфологическая последовательность сохраняется на диаграммах: галактики более позднего типа являются в среднем более голубыми.

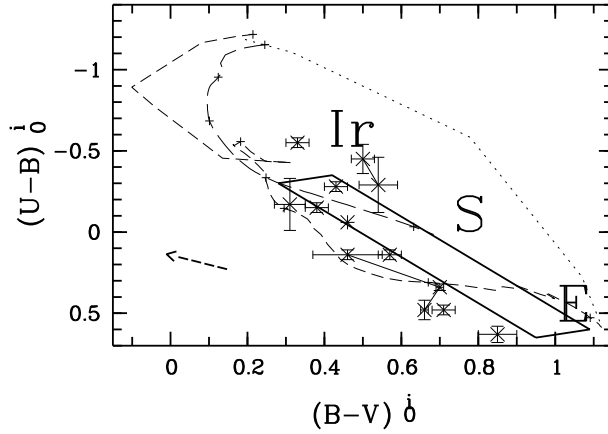


Рис. 6. Двухцветная диаграмма $(U-B)-(B-V)$. Параллелепипедом ограничена область НПЦ. Пунктиры — эволюционные треки звездных систем с отсутствием звездообразования (короткий пунктир, внизу) и постоянным темпом звездообразования (длинный пунктир, вверху). Крестиками на треках отмечены возрасты 10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9 и 10^{10} лет (большие значения $U-B$ соответствуют большим возрастам). Точечная линия — изменение цвета при вспышке звездообразования в старой звездной системе (от 0 до 10 % по массе молодых звезд). Показано расположение галактик различных морфологических типов на НПЦ. Косые крестики с ба-рами ошибок — положения различных областей галактики NGC 2336 на диаграмме (по [8]). Стрелка — смещение точек, вызываемое селективным поглощением пылью

К сожалению, в отличие от методов звездной астрономии, где параметры объектов, как правило, однозначно можно определить по положению на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, параметры таких сложных звездных систем, как галактики, можно корректно оценить на двухцветных диаграммах лишь качественно. Количественную оценку состава звездного населения галактики (или какой-либо ее части) можно сделать лишь с помощью моделей. Наиболее распространенным методом изучения звездного состава является метод эволюционного моделирования. Если число звезд определенной массы m в интервале dm , родившихся за период dt через t лет после

образования системы, равно

$$N = \int_0^T \int_{m_1}^{m_2} M(m) \phi(t) dm dt,$$

тогда, если современный возраст галактики равен T , число существующих в настоящее время звезд с массой m и возрастом τ равно $\phi(T - \tau)M(m)$.

Функция $M(m)$ называется начальной функцией масс (НФМ), а $\phi(t)$ — темпом звездообразования (SFR), суммарной массой звезд, образовавшихся в галактике за единицу времени. Функция $M(m)$ задается в виде $\sim m^{-\alpha}$, а $\phi(t)$ — в виде $\sim \exp(-\beta t)$.

Варьируя параметры α , β и t , можно, в принципе, подобрать множество решений для одного и того же положения объекта на двухцветных диаграммах. Несколько проще обстоит дело с НФМ: еще в 1955 г. Солпитер [11] эмпирически нашел, по-видимому, фундаментальную зависимость $\alpha = 2.35$. В последующие годы НФМ Солпитера пытались неоднократно модернизировать, но большинство специалистов до сих пор пользуются именно НФМ Солпитера.

Параметр β обычно принимается равным константе по времени, причем для эллиптических галактик он стремится к ∞ и уменьшается вдоль хаббловской морфологической последовательности до 0 для спиральных галактик крайне поздних типов (и неправильных галактик). То есть при переходе от галактик ранних к галактикам поздних типов процесс звездообразования растягивается во времени. Существуют, однако, и альтернативные модели истории звездообразования (бимодальное звездообразование, многократные вспышки звездообразования и др.).

Как правило, галактики в целом и их отдельные компоненты расположены на двухцветных диаграммах вдоль НПЦ — области, в которой расположены объекты с экспоненциальным падением темпа звездообразования от времени. Почти постоянное исключение из этого правила составляют бары. Они располагаются на диаграммах левее НПЦ, что можно объяснить либо их относительной молодостью, либо недостатком звезд промежуточного возраста [9]. На рис. 6 бар (три крестика, соединенных сплошной ломаной линией) также расположен левее НПЦ. Теоретическое объяснение этого до сих пор не найдено.

С помощью двухцветных диаграмм исследуют также неразрешимые на звезды молодые области звездообразования (ОЗО, рис. 7).

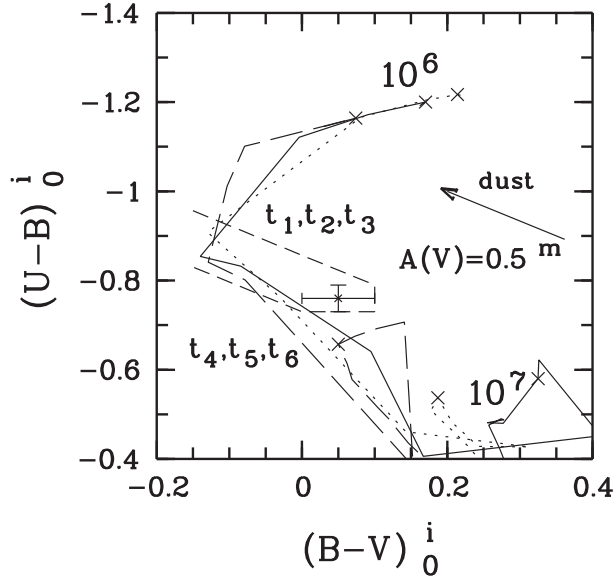


Рис. 7. Метод оценки возраста и внутреннего поглощения в области звездообразования (крестик с баром ошибок) по положению на двухцветной диаграмме $(U - B) - (B - V)$. Показаны эволюционные треки звездных систем различной металличности, звездообразование в которых завершилось за первые 10^6 лет. Обозначены возрасты модельных систем. Стрелка — смещение точек, вызываемое селективным поглощением пылью. Область пересечения эволюционных треков с возможными из-за смещения, вызванного пылью, положениями ОЗО есть область возможных возрастов ОЗО для данной модели истории звездообразования

К сожалению, данных одной фотометрии недостаточно для точного и одновременного определения возраста и поглощения в ОЗО. Если значения металличности и НФМ можно подобрать для звезд ОЗО в разумных пределах, то выбранная модель истории звездообразования (крайние случаи — мгновенная вспышка звездообразования и постоянное звездообразование) сильно исказит результаты. Для бо-

лее точного определения параметров ОЗО необходимы данные спектроскопии о химическом составе звезд и газа и величине внутреннего поглощения в ОЗО.

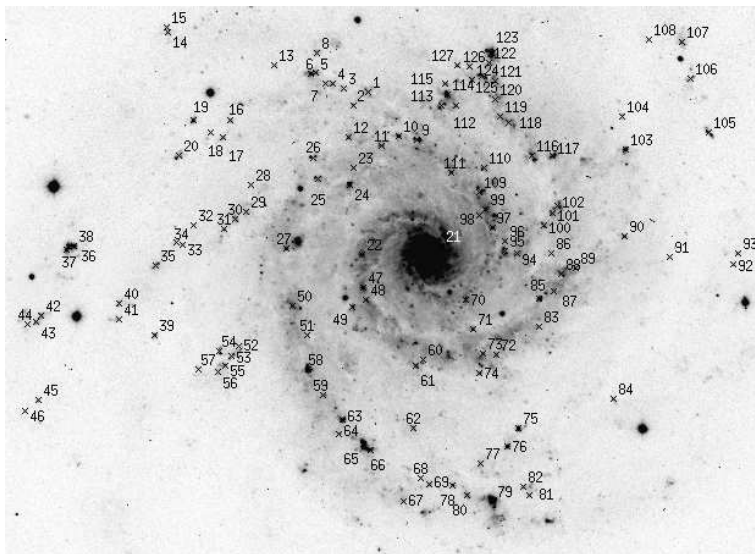


Рис. 8. Изображение NGC 628 в полосе B и положение ОЗО в галактике (крестики). Отмечены порядковые номера ОЗО. Размер изображения $8.26'' \times 6.00''$. Север — сверху, восток — слева

В качестве примера на рис. 8, 9 приведены результаты исследования ОЗО в галактике NGC 628 [10].

Заключение

Таким образом, изучение галактик методом поверхностной фотометрии является одним из наиболее востребованных способов получения информации об их структуре, составе звездного населения, эволюции и помогает решать актуальные проблемы внегалактической астрономии.

Желающим изучить подробнее вопросы, затронутые в данном обзоре, можно порекомендовать книги профессора СПбГУ В. П. Решетникова «Поверхностная фотометрия галактик» [12] и профессора МГУ А. В. Засова «Физика галактик» [13].

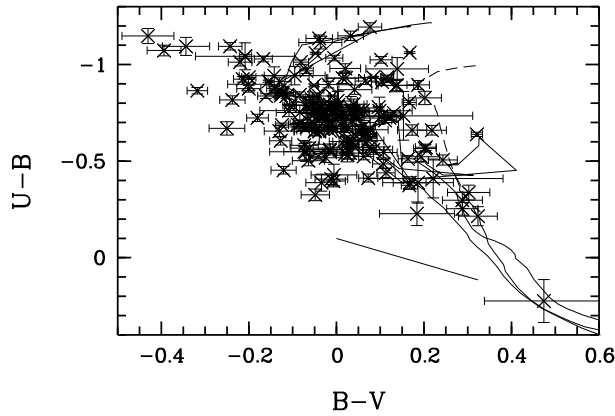


Рис. 9. Положение ОЗО NGC 628 на двухцветной диаграмме $(U - B) - (B - V)$ (крестики с барами ошибок). Показаны эволюционные треки стареющих звездных систем различной металличности с отсутствием звездообразования (сплошные кривые) и постоянным по времени звездообразованием (пунктирная кривая). Прямая — линия смещения точек, вызываемая селективным поглощением пылью

Автор благодарит за поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (проект 05-02-16454).

Список литературы

1. *Reynolds J. H.* The light curve of the Andromeda nebula (NGC 224) // *MNRAS*. 1913. Vol. 74. P. 132.
2. *Гинзбург В. Л.* О физике и астрофизике: Статьи и выступления. М.: Наука, 1992. 528 с.
3. *Sersic J. L.* Atlas de galaxias australes. Cordoba: Observatorio Astronomico, 1968.
4. *Silchenko O. K.* Face-on Galaxies NGC 524 and NGC 6340: Chemically Decoupled Nuclei and Inclined Circumnuclear Disks // *Astrophys. J.* 2000. Vol. 120. P. 741.
5. *Гусев А. С.* Многоцветная ПЗС-фотометрия шести линзовидных и спиральных галактик. Особенности структуры галактик // *Астрон. журн.* 2006. Т. 83. С. 195.

6. *Гусев А. С.* Свойства дисков галактик в оптическом и ближнем ИК-диапазонах // Астрон. журн. 2007. Т. 84. С. 3.
7. *Гусев А. С., Засов А. В., Кайсин С. С.* Фотометрия спиральной галактики низкой светимости NGC 4136 // ПАЖ. 2003. Т. 29. С. 414.
8. *Gusev A. S., Park M.-G.* Structure and stellar population of ringed barred galaxy NGC 2336 // A&A. 2003. Vol. 410. P. 117.
9. *Гусев А. С.* Фотометрические свойства баров галактик // Астрон. журн. 2000. Т. 77. С. 654.
10. *Бруевич В. В., Гусев А. С., Ежкова О. В. и др.* Сопоставление UVVR-фотометрии гигантских областей НП в галактике NGC 628 с детальной сеткой эволюционных моделей звездных скоплений // Там же. 2007. Т. 84. В печати.
11. *Salpeter E. E.* The Luminosity Function and Stellar Evolution // Astrophys. J. 1955. Vol. 121. P. 161.
12. *Решетников В. П.* Поверхностная фотометрия галактик. СПб.: СПбГУ, 2003. 152 с.
13. *Засов А. В.* Физика галактик. М.: МГУ 1993. 112 с.

РАДИОАСТРОНОМИЯ ЗАВТРАШНЕГО ДНЯ

Обсуждаются актуальные задачи радиоастрономии и выдвигаемые ими технические требования к инструментам. Описываются наземные и космические радиоастрономические проекты, реализация которых ожидается в недалеком будущем.

The present-day tasks of radio astronomy and the technical requirements to the facilities implied by them are discussed. The ground-based and space radio astronomical projects which are expected to be fulfilled in the near future are described.

Введение

Радиоастрономия — молодая наука. За несколько десятилетий ее истории возможности радиоастрономических инструментов возросли неизмеримо (см., например, рис. 1). С их помощью сделано множество выдающихся открытий, некоторые из которых отмечены Нобелевскими премиями. Но современная астрофизика предъявляет новые, значительно более высокие требования к радиоастрономическим системам по чувствительности, по угловому разрешению и по другим параметрам. В соответствии с этим в настоящее время существует целый ряд радиоастрономических проектов, реализация которых выведет радиоастрономические исследования на совершенно новый уровень.

Актуальные задачи радиоастрономии и технические требования к инструментам

Радиоастрономия вносит неоценимый вклад в решение самых разных астрофизических проблем — от исследования близких объектов Солнечной системы до космологии [2]. Во многих случаях именно радиоастрономические данные несут наиболее ценную информацию об исследуемых объектах и явлениях. Яркий пример — космология,

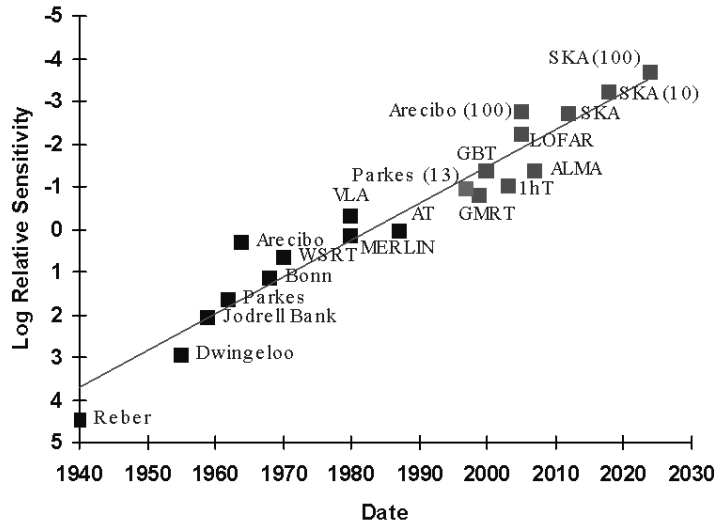


Рис. 1. Прогресс в чувствительности радиотелескопов [1]

которая за последние годы стала точной наукой благодаря ряду блестящих радиоастрономических экспериментов. В этих экспериментах удалось, в частности, с высокой точностью измерить характеристики мелкомасштабной анизотропии «реликтового» микроволнового фона, что, в свою очередь, позволило существенно уточнить многие космологические параметры. Однако полученные данные указывают и на необходимость проведения подобных экспериментов с лучшей чувствительностью и угловым разрешением для исследования пространственного спектра флуктуаций на меньших масштабах, а также для измерения поляризации «реликтового» фона.

Значительное повышение чувствительности и углового разрешения радиоастрономических измерений является общим требованием многих актуальных астрофизических задач. Методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) сейчас удается получить разрешение $\sim 10^{-4}$ угл. с. Что позволяет видеть структуру активных областей некоторых квазаров и ее эволюцию, следить за перемещением мазерных конденсаций в областях звездообразования и пр. Но для исследования механизмов активности ядер галактик и квазаров требуется еще более высокое разрешение, недостижимое с

базами, ограниченными диаметром Земли. Таким образом, требуется создание космических интерферометров с существенно большими базами.

Увеличение длины базы интерферометра позволяет значительно повысить угловое разрешение. Однако при сохранении размеров отдельных элементов чувствительность такой системы по яркостной температуре будет невелика. Для исследования не только экстремально ярких объектов нужны антенные системы с очень большой суммарной собирающей площадью.

Еще одна проблема современной радиоастрономии — ограничение частотного диапазона инструментов атмосферой и ионосферой. Например, большая часть субмиллиметрового диапазона длин волн недоступна для наблюдений с поверхности Земли. В то же время именно в этом диапазоне лежат очень информативные переходы многих важных для астрофизики и астрохимии атомов и молекул. Решение этой проблемы требует создания инструментов космического базирования в этом диапазоне.

Рассмотрение отдельных специфических задач позволяет конкретизировать технические требования к радиоастрономическим инструментам. Такой анализ является неотъемлемой частью каждого из перспективных проектов, которые рассматриваются ниже. Причем задача создания радиотелескопа с требуемыми параметрами включает в себя разработку как антенной системы, так и приемной аппаратуры.

Перспективные радиоастрономические проекты

Выше было отмечено, что основные требования к перспективным радиоастрономическим системам — это радикальное повышение чувствительности и углового разрешения, а также расширение частотного диапазона. Ниже мы коротко опишем наиболее масштабные современные проекты, нацеленные на реализацию этих требований. Стоит иметь в виду, что помимо них (или в дополнение к ним) существует немало других важных и интересных проектов.

Наземные инструменты

ALMA — Atacama Large Millimeter Array

Наиболее амбициозный наземный проект в области миллиметровой и субмиллиметровой астрономии — это Большая миллиметровая

решетка в Атакаме (ALMA — Atacama Large Millimeter Array) [3]. Рабочий диапазон частот от ~ 30 до ~ 1000 ГГц (диапазон длин волн от 1 см до 0.3 мм). Для уменьшения влияния атмосферы, которое очень велико в этом диапазоне, решетка строится на высокогорном плато (высота 5000 м) в пустыне Атакама (Чили). Она будет состоять из 64 12-м антенн с точностью поверхности 20 мкм. Наибольшая база около 15 км и разрешение ~ 6 мс дуги. Полная площадь более 7000 м². Чувствительность и угловое разрешение будут равняться или превосходить достигнутые в оптике и ИК-диапазонах. Научные цели включают в себя исследования мельчайших структур и наиболее далеких объектов.

В настоящее время на месте будущего расположения ALMA уже запущен в эксплуатацию одиночный субмиллиметровый радиотелескоп APEX (Atacama Pathfinder EXperiment) [4]. В принципе, это самостоятельный уникальный инструмент для астрофизических исследований в малоосвоенном диапазоне, непосредственно не связанный с ALMA. Но результаты измерений на этом телескопе будут полезны при выборе объектов для ALMA. Кроме того, приемные технологии, которые сейчас отрабатываются на APEX, видимо, найдут применение в проекте ALMA.

SKA — Square Kilometer Array

Название проекта говорит само за себя. Его цель — создание антенной решетки с общей собирающей площадью ~ 1 км² [5]. Это на два порядка превосходит площадь крупнейших современных инструментов, например VLA. Планируемый диапазон частот — от 0.1 до 25 ГГц. Хотя общая концепция построения системы уже более или менее выработана, место расположения SKA пока окончательно не определено. В списке кандидатов — Австралия и Южная Африка. Полномасштабное строительство планируется на следующее десятилетие.

LMT — Large Millimeter Telescope

В настоящее время в Мексике заканчивается строительство 50-м радиотелескопа миллиметрового диапазона длин волн с расчетной предельной длиной волны ~ 1 мм (рис. 2) [6]. Радиотелескоп расположен на высоте 4600 м над уровнем моря. По многим параметрам он будет сопоставим с ALMA, а в чем-то даже ее превзойдет. Ширина диаграммы направленности на волне 1 мм составит около 5'', что

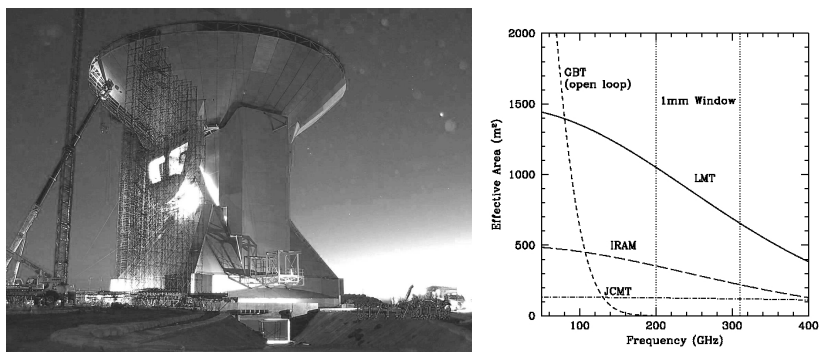


Рис. 2. Внешний вид строящегося в Мексике радиотелескопа LMT (слева) и сравнение его по эффективной площади с некоторыми другими радиотелескопами (справа) [6]

предъявляет очень высокие требования к системе наведения, особенно учитывая ветры и температурные градиенты. Поверхность антенны будет подстраиваться к требуемой форме с помощью большого числа актуаторов. Одна из нерешенных пока проблем — оперативные измерения формы поверхности. Стоит отметить, что значительная часть приемников для LMT уже изготовлена. Некоторые из них сейчас используются на других инструментах.

РТ-70 (Суффа)

Проект, подобный LMT, но более амбициозный, начал осуществляться еще 25 лет тому назад в СССР. Планировалось строительство 70-м радиотелескопа с предельной длиной волны ~ 1 мм на высокогорном плато Суффа в Узбекистане. Так же, как и у LMT, поверхность антенны должна была быть подстраиваемой. Было уже построено основание антенны и изготовлена большая часть металлоконструкций. К сожалению, последние 15 лет строительство не велось, но есть надежда на его возобновление и завершение [7].

Космические проекты

К настоящему времени уже осуществлен ряд проектов, посвященных радиоастрономическим измерениям из космоса. Это ODIN и SWAS, с помощью которых, в частности, изучалось содержание воды

и кислорода в межзвездных облаках; первый спутник для радиоинтерферометрии на базах Земля—космос VSOP (HALCA); аппараты «Реликт», COBE и WMAP, с помощью которых исследовался микроволновый «реликтовый» фон. Сейчас готовится несколько новых космических экспериментов с существенно более высокими возможностями. В частности, это разрабатываемые Европейским космическим агентством аппараты Hershel и Planck, которые должны быть запущены в недалеком будущем одной ракетой-носителем, а также российские проекты «Радиоастрон» и «Миллиметрон».

Hershel

Проект Hershel (ранее он назывался FIRST) предполагает вывод в точку Лагранжа L2 субмиллиметрового телескопа с зеркалом диаметром 3.5 м [8]. На нем планируется установить несколько инструментов, в частности, гетеродинный спектрометр HIFI, перекрывающий диапазон от 480 до 1910 ГГц, а также матрицы болометров и спектрометров низкого разрешения на диапазон длин волн от 60 до 670 мкм. Этот аппарат позволит, в частности, впервые проводить полные спектральные обзоры в субмиллиметровом диапазоне, не ограниченные окнами прозрачности атмосферы. Научные задачи включают в себя исследования образования звезд и галактик, астрохимию, изучение химического состава атмосфер планет, спутников планет и комет.

Planck

Аппарат Planck предназначен для исследования космического микроволнового («реликтового») фона с чувствительностью и угловым разрешением намного превосходящими те, что были реализованы в предыдущих космических аппаратах, использовавшихся для этой цели [9]. Так, температурная чувствительность должна составить $\Delta T/T \sim 10^{-6}$ на всех угловых масштабах более 10 угл. мин. Это позволит определить фундаментальные космологические параметры с точностью несколько процентов. Данные Planck будут использоваться для проверки космологических моделей и моделей образования структур во Вселенной, для измерения эффекта Сюняева—Зельдовича (как теплового, так и кинематического) и пр. Первичное зеркало телескопа имеет размер ~ 1.5 м. Приемники перекрывают диапазон от ~ 30 ГГц до ~ 1 ТГц.

Радиоастрон

Международный проект РадиоАстрон предусматривает запуск космического 10-м радиотелескопа на высокоапогейную орбиту (350 тыс. км) спутника Земли [10]. Цель проекта состоит в том, чтобы создать совместно с глобальной наземной сетью радиотелескопов систему наземно-космического интерферометра для получения изображений и координат различных объектов Вселенной с разрешением до 8 мкс дуги для самой короткой длины волны проекта 1.35 см. В проекте принимают участие несколько стран. Научные задачи включают в себя исследования активных ядер галактик, строения и динамики областей звездообразования в нашей Галактике, построение высокоточной астрономической координатной системы и пр.

Миллиметрон

Проект предполагает создание космической обсерватории миллиметрового, субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн с криогенным телескопом диаметром 12 м, работающим в автономном режиме и как интерферометр с базами «Земля—Космос» (с наземными телескопами) и «Космос—Космос» (после запуска второго аналогичного космического телескопа). Обсерватория обеспечит проведение астрономических исследований с сверхвысокой чувствительностью (до наноЯнских) в автономном режиме и с сверхвысоким угловым разрешением (до наносекунд дуги) — в интерферометрическом [11]. Планируемые частотные диапазоны лежат в интервале от 15 ГГц до 15 ТГц.

Заключение

Реализация описанных выше проектов (которая ожидается в течение ближайших 10—15 лет) на порядки повысит возможности радиоастрономии по чувствительности и угловому разрешению инструментов. Впервые станет возможным проведение исследований в ранее недоступном частотном диапазоне. Перспективы дальнейшего развития радиоастрономии менее ясны, интересные варианты обсуждаются, например, в работах Ю. Н. Парийского [12].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 06-02-16317), ИНТАС (грант 03-51-4145) и программы «Протяженные объекты в астрономии» ОФН РАН.

Список литературы

1. *Ekers R. D., Bell J. F.* The Future of Radio Astronomy: Options for Dealing with Human Generated Interference // Preserving the Astronomical Sky, Proc. of IAU Symposium 196, held 12–16 July 1999, in Vienna, Austria Ed. by R. J. Cohen and W. T. Sullivan. 2001. P. 199
2. *Зинченко И. И.* Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. С. 641.
3. <http://www.alma.info/>
4. <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/mm/apex.html>
5. <http://www.skatelescope.org/>
6. <http://www.lmtgtm.org/>
7. <http://www.asc.rssi.ru/suffa/iraos.htm>
8. <http://sci.esa.int/herschel>
9. <http://sci.esa.int/planck>
10. <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/rus/index.html>
11. <http://www.asc.rssi.ru/millimetron/default.htm>
12. *Parijskij Yu. N.* Radio astronomy: The Next 70-Year Step // EAS Publications Ser. 2005. Vol. 15. P. 479.

НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Современные методы *детерминированного* прогноза временных рядов основаны на реконструкции топологической модели динамической системы в евклидовом пространстве подходящей размерности [1, 2]. Для этого предполагается, что система описывается потоком на компактном d -мерном дифференцируемом многообразии M . Наблюдения рассматриваются как морсовская проекция фазовой траектории. Тогда отображение запаздывающих координат, согласно теореме Такенса, с точностью до предположения о типичности является топологическим вложением ряда в евклидово пространство R^m , если $m \geq 2d + 1$. Образ вложения является гладким подмногообразием и диффеоморфен M . Следовательно, полученная копия наследует все топологические характеристики оригинала, и ее можно использовать для оценки динамических инвариантов.

Для предсказания используется динамика реконструкции, а предиктором служит нелинейная вектор-функция от m переменных — отсчетов ряда. Прогноз сводится к поиску подходящей аппроксимации непрерывной функции m переменных, которая определена лишь на конечной «обучающей» выборке из истории ряда. Поэтому задача аппроксимации не является корректной и решается только на уровне математически правдоподобных утверждений с помощью локальных и глобальных методов [2]. Оптимальным аппроксиматором может служить искусственная нейронная сеть.

Вероятностное предсказание используют в ситуациях, когда динамика исходной системы не является детерминированной. Состояние динамической системы можно идентифицировать лишь в «крупнозернистом приближении», т. е. с точностью до конечного клеточного разбиения фазового пространства. Эволюция системы определяется в этом случае матрицей переходных вероятностей точки из одной клетки в другие. Соответствующие предикторы основаны фактически на *Марковских* процессах [3]. Моделью такого процесса является случайная динамическая система, определенная набором непрерывных сжимающих преобразований с вероятностями, заданными на компактном подмножестве. Каждое преобразование выби-

рается с помощью заданного случайного процесса. Такие отображения хорошо известны в геометрии фракталов. Они называются *системами итеративных функций* — *IFS* [4].

Приятной особенностью множества случайных орбит *IFS* является существование инвариантной эргодической меры. Носителем этой меры является аттрактор *IFS*.

Вероятностное предсказание с помощью *IFS* сводится к двум задачам. Первая заключается в построении грубого разбиения состояний системы на основе наблюдаемого временного ряда для эмпирической оценки инвариантной меры. Это удобно сделать, используя методы символической динамики. Второй задачей Марковского предсказания является построение теоретической модели, в которой мера генерируется случайной динамической системой. Изложенная теория иллюстрируется практическими примерами предсказания магнитных бурь [5].

Список литературы

1. Макаренко Н. Г. Реконструкция систем по хаотическим временным рядам // Нелинейные Волны 2004. Нижний Новгород, 2004. С. 398.
2. Макаренко Н. Г. Эмбедология и нейропрогноз // Лекции по нейроинформатике. Ч. 1. Нейроинформатика-2003. М., МИФИ, 2003. С. 86.
3. Макаренко Н. Г. Современные методы нелинейного прогноза временных рядов // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. С. 1408.
4. Макаренко Н. Г. Фракталы, аттракторы, нейронные сети и все такое // Лекции по нейроинформатике. Ч. 2. Нейроинформатика-2002. М., МИФИ, 2002. С. 121.
5. Макаренко Н. Г., Каримова Л. М., Мухамеджанова С. А. и др. Система итеративных функций и Марковский прогноз временных рядов // Прикладная нелинейная динамика. 2006. № 6. (В печати).

ЗВЕЗДЫ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ГАЛО ГАЛАКТИКИ

Введение

Еще совсем недавно полагали, что наша Галактика сформировалась из единого протогалактического облака и все ее объекты генетически связаны между собой. Однако многочисленные наблюдения последних лет демонстрируют нам убедительные свидетельства того, что Галактика, являющаяся вторым по величине членом Местной Группы, тесно взаимодействует с менее массивными наиболее близкими к ней галактиками-спутниками и, постепенно разрушая их, захватывает их межзвездное вещество, отдельные звезды и шаровые скопления. В частности, уже более 30 лет известен газово-пылевой шлейф, называемый Магеллановым Поток. Как полагают, около 2.2 млрд лет назад, когда Магеллановы Облака подошли близко к нашей Галактике, совместное притяжение Галактики и БМО оторвало часть газа от внешней области ММО. Примерно половина этого газа, замедлившись, растянулась по орбите Магеллановых Облаков, отставая от них, а другая половина ускорила и оказалась впереди этих галактик. Другой пример — разрушение приливными силами нашей Галактики карликовой сферической галактики Сагиттариус. С этой галактикой уверенно ассоциируются четыре шаровых скопления: М 54, Арг 2, Тер 8 и Тер 7. Скопление Pal 12 находится на значительном удалении от этой галактики, но, согласно точно восстановленным орбитам обеих звездных систем, была выброшена из Srg примерно 1.5 млрд лет назад. Ядром системы обычно полагают очень массивное шаровое скопление М 54. Кроме того, системе Сагиттариус с большой вероятностью принадлежат еще пять шаровых скоплений: М 53, Pal 5, NGC 4147, NGC 5053 и NGC 5634. Элементы галактических орбит скоплений Rup 106, Pal 13, NGC 5466, NGC 6934 и NGC 7006 также указывают на то, что они были захвачены из различных галактик-спутников. Считается, что даже ω Cep, крупней-

шее из известных шаровых скоплений Галактики, находящееся довольно близко к галактическому центру и имеющее ретроградную орбиту, в свое время также было ядром карликовой галактики.

Теория динамической эволюции предсказывает неизбежную диссипацию скоплений в результате совместных действий звездно-звездных сближений, приливных разрушений и ударных взаимодействий с диском и балджем Галактики. И действительно, у всех скоплений, для которых удалось получить качественное оптическое изображение, обнаружались следы приливного взаимодействия с Галактикой в форме протяженных деформаций (приливных хвостов). Удалось даже оценить, что в результате последнего прохождения через плоскость галактического диска скопление ω Cep потеряло в виде звезд лишь чуть меньше 1 % своей массы. Таким образом, даже в ближайшей околосолнечной окрестности мы можем попытаться идентифицировать звезды внегалактического происхождения.

Аккрецированные шаровые скопления и лириды поля

Исследования показывают, что населения старейших объектов Галактики — шаровых скоплений и переменных звезд типа RR Лиры поля — являются составляющими по крайней мере трех подсистем Галактики. При этом металлические объекты образуют быстро вращающуюся и весьма сплюснутую подсистему толстого диска. Менее металлические объекты, в свою очередь, делятся на два типа населений. Поскольку все шаровые скопления, внегалактическое происхождение которых установлено по их пространственным положениям и элементам их галактических орбит, демонстрируют более красные горизонтальные ветви, чем основная масса скоплений Галактики аналогичной металличности, то представляется естественным предположить, что все скопления с аномальным строением горизонтальных ветвей являются аккрецированными [1]. Для звезд же поля существует некое критическое значение остаточной скорости, выше которой большая часть звезд находится на ретроградных орбитах (а ретроградность является убедительным свидетельством в пользу образования объектов не из вещества единого протогалактического облака). Одновременно такие высокоскоростные звезды далеко удаляются от галактической плоскости и центра Галактики и демонстрируют резкие отличия в поведении других параметров орбит [2].

Быстрые звезды поля и скопления с аномальным строением горизонтальных ветвей образуют сфероидальную подсистему внешнего аккрецированного гало, примерно в два с половиной раза большего размера, чем все остальные, как мы полагаем, генетически связанные с единым протогалактическим облаком шаровые скопления. При этом полное отсутствие в ней градиентов металличности, преимущественно вытянутые орбиты, большое число звезд с обратным галактическому вращению и зачастую малые возрасты подтверждают гипотезу об их внегалактическом происхождении. Оказалось, что объекты внегалактического происхождения составляют подавляющую долю массы галактического гало.

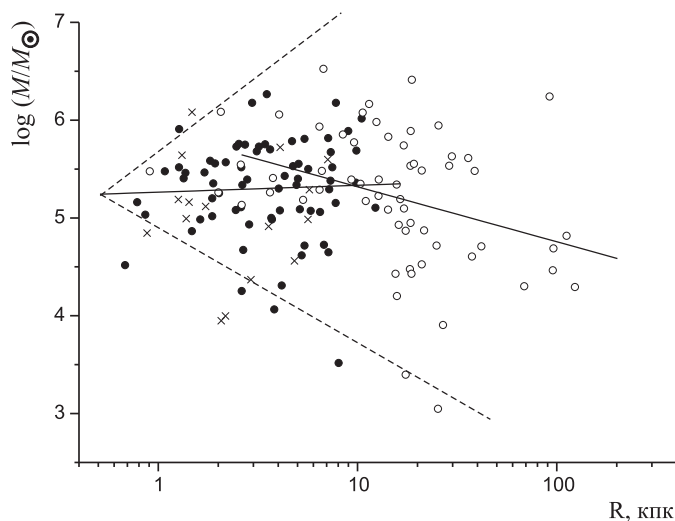


Рис. 1. Зависимость масс шаровых скоплений от галактоцентрического расстояния: кружки — скопления внегалактического происхождения. Сплошные линии — прямые регрессии, пунктирные — «конус выживания»

Очень важными для понимания природы аккрецированных шаровых скоплений и лирид поля являются некоторые их свойства. Так, аккрецированные шаровые скопления продемонстрировали явную зависимость массы от галактоцентрического расстояния (рис. 1). Штриховыми линиями на рисунке ограничена область медленной эволюции шаровых скоплений, так называемый «конус выживания». Верхняя линия соответствует критическому значению

массы, устойчивой для эффектов динамического трения, приводящему к замедлению массивного звездного скопления, движущегося сквозь звезды поля, и разрушению его в центре Галактики под действием приливных сил, а нижняя — для эффектов диссипации с учетом приливных «ударов» при пролете скоплений сквозь галактическую плоскость. С большой вероятностью можно сказать, что скопления, лежащие на диаграмме вне этой области, уже заканчивают свой жизненный путь. Сплошные линии на рисунке представляют собой прямые регрессии, проведенные для генетически связанных и аккрецированных скоплений. Видно, что генетически связанные скопления не обнаруживают изменения средней массы с увеличением расстояния от галактического центра. Зато для аккрецированных скоплений наблюдаемая антикорреляция отлична от нуля далеко за пределами ошибок. Следует отметить, что столь далекие скопления не подверглись значительному воздействию диссипации и динамического трения, поэтому во внешнем гало сохранилось почти без изменения их начальное распределение по массам. Другими словами, за пределами орбиты Солнца скопления любой наблюдаемой массы сохраняются дольше возраста Галактики. Таким образом, во внешнем гало с увеличением галактоцентрического расстояния наблюдается увеличивающийся дефицит массивных шаровых скоплений.

Одновременно оказалось, что аккрецированные скопления демонстрируют уменьшение средней массы и с уменьшением возраста. Генетически связанные скопления такого эффекта не обнаруживают. Похоже, что за пределами Галактики чаще образуются скопления с малыми массами. Причем чем больше размеры их современной галактической орбиты, тем меньше скоплений больших масс.

Оба указанных свойства аккрецированных скоплений находят естественное объяснение, если предположить, что шаровые скопления аномально малой массы образуются преимущественно в маломассивных карликовых галактиках-спутниках (в них зачастую мала и скорость звездообразования), которые, даже находясь на довольно больших расстояниях от галактического центра, теряют свои скопления под действием ее приливных сил.

Интересно, что свойства аккрецированных и лирид поля зависят от элементов галактических орбит: их периоды обнаруживают заметную тенденцию уменьшаться с увеличением максимальных удалений точек орбит от центра и плоскости Галактики. В итоге оказы-

вается, что у самых далеких лирид поля периоды меньше $P < 0.55$ дня, т. е. как и у далеких шаровых скоплений аномально малой массы с сильно покрасневшими горизонтальными ветвями. Вполне возможна их генетическая связь.

О чем может рассказать химический состав звезд

Благодаря очень выгодному положению Солнца практически в плоскости Галактики мы имеем возможность наблюдать в непосредственной от себя близости звезды всех ее подсистем и детально исследовать их химический состав. В данном случае нас интересует, различается ли он у генетически связанных и аккрецированных звезд. Дело в том, что химический состав звезд несет в себе информацию об истории звездообразования межзвездного вещества, из которого они образовались [5].

Относительные содержания некоторых химических элементов в атмосферах звезд можно использовать в качестве химического индикатора возраста. Действительно, массивные сверхновые звезды SNe II ($M > 8M_{\odot}$) являются основными поставщиками в межзвездную среду элементов α -захвата, r -процесса и небольшого количества элементов группы железа. Основная же масса элементов группы железа синтезируется в звездах меньших масс ($M = (4 - 8)M_{\odot}$), как результат аккреции вещества на белый карлик в тесных двойных системах, взрывающихся вследствие этого как SNe Ia. Обогащение межзвездной среды α -элементами происходит за более короткое время, чем железом, что обусловлено разницей во временах эволюции сверхновых типа II (≈ 30 млн лет) и Ia (≈ 1 млрд лет). Поскольку вклад SNe Ia в синтез элементов группы железа существенно больше, чем вклад в синтез α -элементов, то отношение $[\alpha/\text{Fe}]$ будет убывать в Галактике по мере обогащения межзвездной среды остатками этих сверхновых. Таким образом, к тому моменту, когда величина $[\alpha/\text{Fe}]$ начнет уменьшаться, пройдет ≈ 1 млрд лет после начальной вспышки звездообразования. Поэтому более молодые звезды имеют в среднем меньшее относительное содержание α -элементов. С другой стороны, чем больше скорость звездообразования в системе, тем при большем значении металличности будет наблюдаться излом зависимости $[\alpha/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ из-за наступления эпохи вспышек SNe Ia и обогащения их выбросами межзвездной среды. В нашей Галактике

этот излом находится в окрестности $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0$. Аналогично ведет себя и обилие элементов, производимых в r -процессе при взрывах SNe II.

Относительные содержания химических элементов дают возможность отследить и ограничения на начальную функцию масс звезд. Действительно, теоретически предсказываемый выход α -элементов увеличивается с ростом массы предсверхновой, поэтому наблюдаемая величина отношения $[\alpha/\text{Fe}]$ в атмосферах самых бедных металлами звезд будет тем больше, чем сильнее начальная функция масс будет сдвинута в массивную сторону. С другой стороны, выход элементов r -процесса связан со вспышками наименее массивных сверхновых II типа. Поэтому отношение содержания европия (элемент r -процесса) к магнию (α -элемент) в следующем поколении звезд указывает на массу сверхновой, обогатившей их протозвездное облако.

Содержания европия и магния в аккрецированных звездах

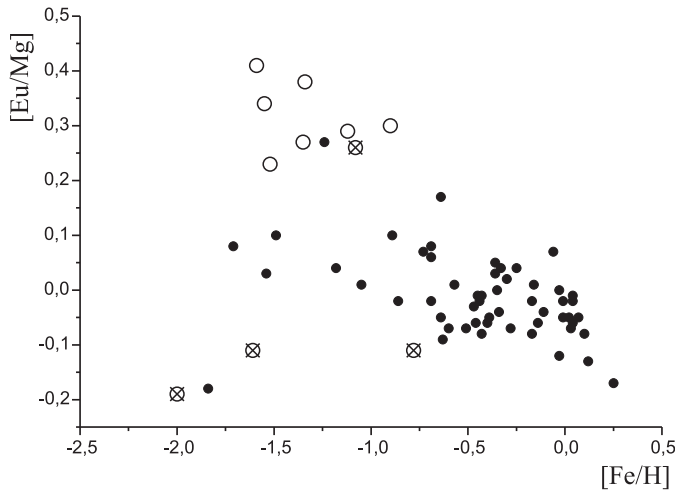


Рис. 2. Связь отношения $[\text{Eu}/\text{Mg}]$ с металличностью для близких звезд: кружки — звезды внегалактического происхождения ($V_{\text{ост}} > 250$ км/с). Крестиком помечены аккрецированные звезды моложе 13 млрд лет

Поскольку α -элементы и элементы r -процесса синтезируются в одних и тех же звездах, наиболее вероятная величина отношения $[\text{Eu}/\text{Mg}]$ у звезд, образовавшихся из единого, хорошо перемешанного протогалактического облака, должна быть равной нулю. Однако из рис. 2 видно, что все предполагаемые аккрецированные звезды демонстрируют отклонения от наиболее вероятного нулевого значения, тогда как у всех генетически связанных с Галактикой звезд величина $[\text{Eu}/\text{Mg}] \approx 0.0$. Избыток европия относительно магния почти у всех старых аккрецированных звезд заставляет нас предположить, что начальная функция масс звезд, образующихся за пределами протогалактики, была «обрезана» со стороны больших масс и начиналась с $M \approx 10M_{\odot}$. В итоге и выход α -элементов оказался меньше, чем внутри единого протогалактического облака, где массы предсверхновых были больше. Поэтому в малометаллических аккрецированных звездах очень часто мало и содержание магния относительно железа, тогда как в генетически связанных с Галактикой малометаллических звездах отношение $[\text{Mg}/\text{Fe}] > 0.2$, что полностью согласуется с закрытой моделью химической эволюции (рис. 3). Действительно, низкие отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ у очень малометаллических звезд естественнее объясняются малыми массами предшественниц SNe II, чем инъекцией элементов группы железа сверхновыми типа Ia, поскольку тогда в этих звездах должен наблюдаться одновременно и дефицит европия. Но европия в этих звездах, как видим, наоборот – избыток. Таким образом, слабое перемешивание внегалактической среды объясняет лишь общий разброс отношений $[\text{Eu}/\text{Mg}]$ в аккрецированных звездах, а преобладание среди них звезд с избытком европия относительно магния и дефицитом магния относительно железа обусловлено меньшими, чем в Галактике, типичными массами предсверхновых SNe II за пределами Галактики.

Чтобы обосновать это предположение, желательно выделить в аккрецированном гало генетически связанные между собой звезды. Помочь это сделать могут результаты численного моделирования иерархического формирования галактического гало, согласно которым орбиты сравнительно массивных карликовых галактик-спутников со временем существенно уменьшаются в размерах и перемещаются в галактическую плоскость динамическим трением. Такие галактики, приобретя очень вытянутые и практически параллельные галактическому диску орбиты, интенсивно разрушаются при каждом своем прохождении перигалактического расстояния, теряя звезды с четко детерминированными орбитальными энергиями и угловы-

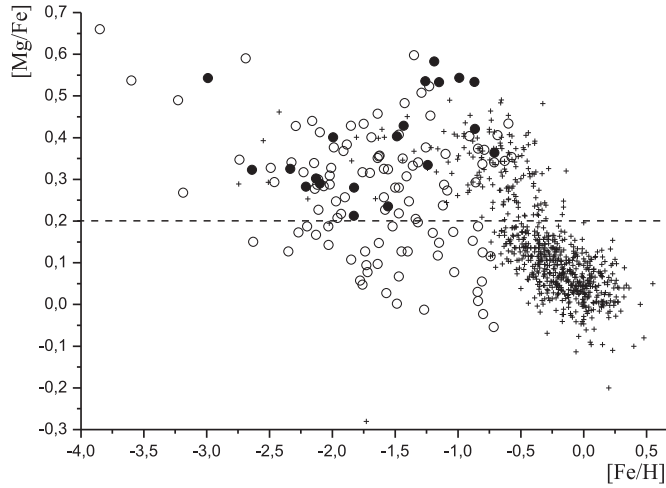


Рис. 3. Диаграмма $[\text{Fe}/\text{H}] - [\text{Mg}/\text{Fe}]$ для близких звезд: заштрихованные кружки — звезды собственного гало Галактики, крестики — звезды дисковых подсистем, незаштрихованные кружки — звезды внегалактического происхождения

ми моментами. Поэтому если наблюдатель находится между апогалактическим и перигалактическим радиусами такой орбиты, ее приливный «хвост» будет наблюдаться в виде «движущейся группы» звезд с малыми вертикальными компонентами скоростей и широким, симметричным и часто двухвершинным распределением радиальных компонентов пространственных скоростей.

Выделим по кинематическим критериям среди близких звезд с известными содержаниями химических элементов звезды весьма многочисленной движущейся группы Центавра. Эти звезды, как полагают, потеряны карликовой галактикой, центром которой было скопление ω Cep. Из рис. 4 можно увидеть, что все они расположились вдоль довольно узкой полосы, которая при малых металличностях ($[\text{Fe}/\text{H}] < -1.3$) демонстрирует примерно постоянную величину отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}] \approx 0.35$. Но затем, при увеличении металличности, начиная от этой точки, наблюдается резкое падение относительного содержания магния вплоть до отрицательных величин. Такое поведение очень похоже на ожидаемую зависимость отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$, получаемую в закрытой модели химической эволюции,

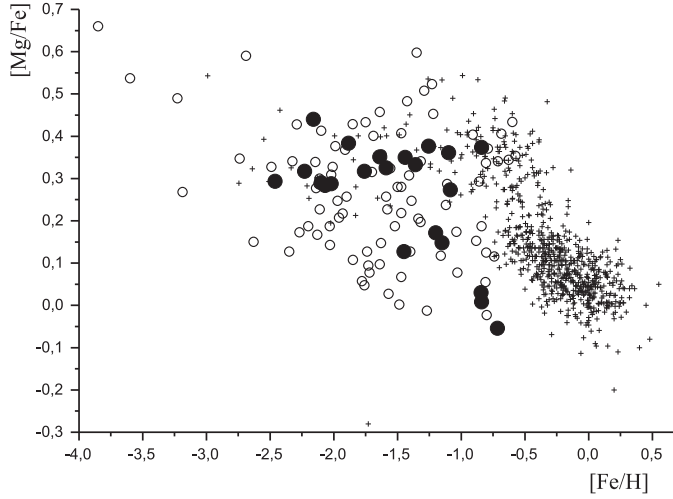


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но среди аккрецированных выделены звезды движущейся группы Центавра

что является независимым свидетельством в пользу генетической связи выделенных звезд. Значит, низкие относительные содержания магния в наиболее богатых металлами звездах этой группы получились из-за начавшихся в их родительском протогалактическом облаке вспышек SNe Ia, выбросивших в межзвездную среду большое количество атомов железа и понизивших величину отношения $[Mg/Fe]$. Существенно меньшая, чем в Галактике, металличность «точки излома» на этой зависимости говорит о том, что звезды движущейся группы Центавра родились из вещества, в котором скорость звездообразования была значительно ниже, чем в ранней Галактике. Значит, по крайней мере в этой, первоначально довольно массивной ($M \approx 10^9 M_{\odot}$) разрушенной галактике-спутнике, средние массы предшественниц сверхновых типа II были такими же, как в нашей Галактике.

Менее же массивные галактики-спутники, согласно теоретическим расчетам, должны разрушаться раньше, чем их орбиты успеют существенно измениться. Поэтому потерянные ими звезды должны находиться на более высоких, протяженных и одновременно вытянутых орбитах. Проверим это теоретическое предположение. Из рис. 5 видно, что только медленно обращающиеся вокруг галактического

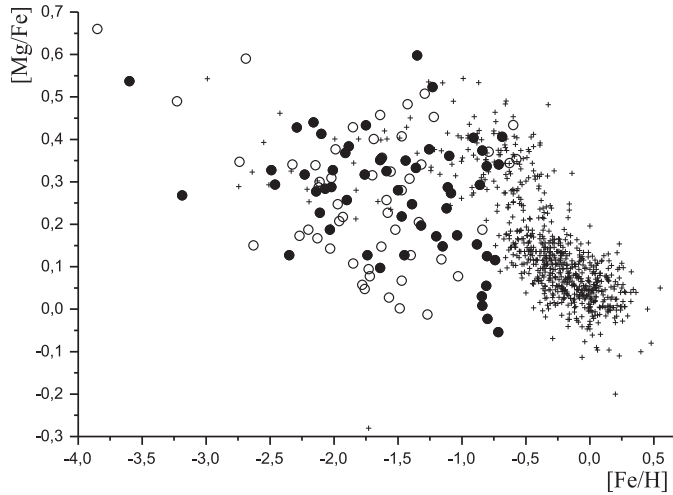


Рис. 5. То же, что на рис. 3; выделены медленно обращающиеся вокруг галактического центра аккрецированные звезды ($|V_{\text{вр}}| < 50$ км/с)

центра звезды с малыми отношениями $[\text{Mg}/\text{Fe}] < 0.2$ наблюдаются при $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$. (Среди них находятся и звезды движущейся группы Центавра — при ретроградном вращении угловой момент этой группы близок к нулю.) Следовательно можно предположить, что все они родились в довольно массивных галактиках-спутниках (подобных родительской галактике звезд движущейся группы Центавра), причем скорость звездообразования в них была понижена, по сравнению с галактической, поскольку звезды из них демонстрируют менее металличную, чем в Галактике, «точку излома». Из рис. 6 а, б, где отмечены только аккрецированные звезды, хорошо видно, что звезд с малыми азимутальными компонентами скоростей Θ большинство. То же можно сказать и о малых наклонах орбит. Это и понятно: сравнительно массивные галактики-спутники теряют много звезд. Видно также, что только звезды с малыми угловыми моментами и наклонами орбит могут иметь высокое содержание магния. В отличие от них быстро обращающиеся вокруг галактического центра звезды и звезды с большими наклонами орбит демонстрируют в основном низкие отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, не характерные для столь малометаллических звезд.

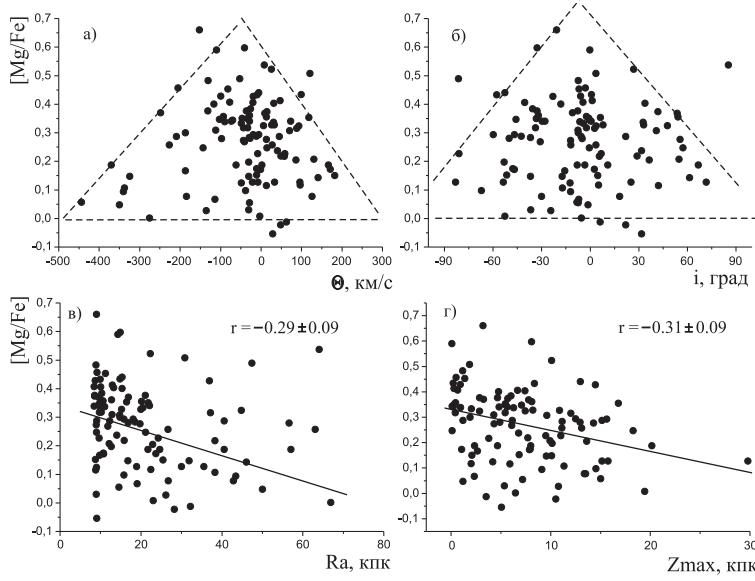


Рис. 6. Связи относительного содержания магния с азимутальной компонентой скорости (а), углом наклона орбиты (б), наибольшими удалениями точек орбит от центра (в) и плоскости (г) Галактики для аккрецированных звезд. Штриховые линии — внешние огибающие. На нижних панелях проведены прямые регрессии и указаны коэффициенты корреляции

Наблюдаемые на рис. 6 в–г отрицательные радиальный и вертикальный градиенты относительных содержаний магния также указывают на малые отношения $[Mg/Fe]$ у аккрецированных звезд с протяженными орбитами. (Эти градиенты отражают размеры орбит, находясь на которых галактики-спутники теряют свои звезды.) Одновременно анализ показывает, что низкие содержания магния наблюдаются преимущественно у звезд с очень большими эксцентриситетами, что находится в полном соответствии с предсказаниями численного моделирования. Таким образом, получается, что размеры, наклоны и эксцентриситеты орбит у аккрецированных звезд, а значит и у их распадающихся родительских галактик, в среднем увеличиваются с уменьшением относительного содержания в них магния. Протяженные, вытянутые и одновременно наклонные орбиты, согласно численному моделированию иерархического формирования

галактического гало, как было отмечено выше, следует ожидать у остатков маломассивных галактик-спутников, которые разрушаются раньше, чем их орбиты заметно изменятся под действием приливных сил Галактики.

По-видимому, после своего формирования маломассивные галактики, пересекая галактическую плоскость, начинают терять не только звезды, но и межзвездный газ. Звездообразование в них, ввиду потери межзвездного вещества, заканчивается довольно быстро, поэтому у них мы почти не видим богатых металлами звезд и поэтому вряд ли аномально низкие отношения $[Mg/Fe]$ у потерянных ими малометаллических звезд обусловлены исключительно крайне низкой скоростью звездообразования в их родительских карликовых галактиках. Как мы теперь видим, основная причина этого кроется в том, что в менее массивных карликовых галактиках начальная функция масс звезд просто урезается со стороны больших масс. В итоге сверхновые типа II выбрасывают в межзвездную среду меньшее количество легких α -элементов и отношения $[Mg/Fe]$ у звезд становятся аномально низкими по сравнению со звездами такой же металличности, генетически связанных с единым протогалактическим облаком.

Зависимость максимальных масс звезд от массы родительской галактики

Перечислим по порядку все независимые факты, свидетельствующие, что при уменьшении масс карликовых галактик в них одновременно уменьшаются и максимальные массы сверхновых II типа, а следовательно и выход α -элементов. Итак, выше мы отметили, что отношения $[Eu/Mg]$ у значительной части аккрецированных звезд скачком отличаются в большую сторону от аналогичного отношения для малометаллических звезд Галактики. Далее, Диквер и др. [4] различие наклонов корреляций между первичными и вторичными α -элементами в 21 звезде с умеренным дефицитом металлов объяснили тем, что звезды, демонстрирующие отношения $[\alpha/Fe]$ меньше среднего, образуются в низкомассивных протогалактических фрагментах, «которые не в состоянии поддерживать образование очень массивных звезд». Они полагают, что «даже при неизменной начальной функции масс низкомассивные облака обладают меньшей вероятностью образовывать очень массивные звезды». Непосредственные определения содержаний α -элементов в звездах изолированных карликовых галактик также приводят к аналогичному

выводу. Так, в работе [6] исследован химический состав в 15 красных гигантах из четырех близких, маломассивных ($\approx 2 \times 10^7 M_{\odot}$), весьма диффузных и не имеющих центральных ядер карликовых галактик (Sculptor, Fornax, Carina, и Leo I). Проверка показала, что все эти звезды легли на диаграмме $[\text{Fe}/\text{H}] - [\alpha/\text{Fe}]$, сформировав довольно узкую последовательность, опускающуюся из точки с координатами $([\text{Fe}/\text{H}] \approx -2.0; [\alpha/\text{Fe}] \approx 0.3)$ к точке $(-1.0; -0.2)$, как будто истории звездообразования в них были одинаковы. (В этой же области на диаграмме находятся близкие звезды со скоростями вращения $\Theta > |50|$ км/с.) Авторы утверждают, что столь «низкие относительные содержания α -элементов могли получиться только в случае низких в них скоростей звездообразования и отсутствия вклада в химическую эволюцию от очень массивных звезд ($> (15 - 20) M_{\odot}$)».

Дополнительными аргументами в пользу высказанного предположения служат также отмеченная выше антикорреляция между галактоцентрическими расстояниями и массами шаровых скоплений, имеющих предположительно внегалактическое происхождение, и тенденция уменьшения периодов переменной аккрецированных звезд типа RR Лиры поля с удалением от центра и плоскости Галактики. (Заметим, что средние периоды лирид в малометаллических $([\text{Fe}/\text{H}] < -1.0)$ шаровых скоплениях коррелируют с цветом их горизонтальных ветвей, уменьшаясь с покраснением). Следовательно, можно предположить, что лириды поля с малыми периодами переменной, как и аккрецированные маломассивные шаровые скопления с аномально красными горизонтальными ветвями, преимущественно рождаются в галактиках-спутниках, разрушающихся далеко от центра Галактики, т. е. низкомассивных.

Итак, восемь независимых фактов органично укладываются в рамки единой гипотезы. Согласно ей малометаллические звезды с аномально низким содержанием α -элементов попадают в нашу Галактику из обломков маломассивных галактик-спутников, химическая эволюция в которых проходила не только медленно, но и при отсутствии массивных сверхновых звезд второго типа.

Заключение

В заключение сформулируем основные наблюдательные факты

1. Большинство малометаллических звездных объектов в Галактике имеют внегалактическое происхождение.

2. Массы аккрецированных шаровых скоплений уменьшаются с увеличением галактоцентрического расстояния.
3. Химический состав аккрецированных и генетически связанных звезд Галактики существенно различается.
4. «Точка излома» на диаграмме $[\text{Fe}/\text{H}] - [\text{Mg}/\text{Fe}]$ у звезд движущейся группы Центавра наблюдается при металличности ниже, чем у звезд Галактики.
5. Аккрецированные звезды демонстрируют уменьшение относительных содержаний магния с увеличением размеров, наклонов и эксцентриситетов орбит.

И следующие из них выводы:

1. Звезды движущейся группы Центавра родились из вещества, в котором скорость звездообразования была значительно ниже, чем в ранней Галактике.
2. При уменьшении масс карликовых галактик в них одновременно уменьшаются средние массы шаровых скоплений и максимальные массы сверхновых SNe II. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению относительных содержаний α -элементов в их звездах.

Таким образом, подробный анализ химического состава и элементов галактических орбит звезд, находящихся в настоящее время в окрестностях Солнца, заставляет нас признать, что наша Галактика все еще продолжает развиваться и увеличивать свою массу.

Список литературы

1. Боркова Т. В., Марсаков В. А. // Астрон. журн. 2000. Т. 77. С. 750–772.
2. Боркова Т. В., Марсаков В. А. // Там же. 2002. Т. 79. С. 510–525.
3. Боркова Т. В., Марсаков В. А. // Письма в Астрон. журн. 2004. Т. 30. С. 173–184.
4. Decaewer H., Jehcin, E., Parmentier G. et al. // Astron. Astrophys. 2005. Vol. 433. P. 285.
5. Марсаков В. А., Боркова Т. В. // Письма в Астрон. журн. 2006. Т. 32. С. 545–556.
6. Tolstoy E., Venn K. A., Shetrone M. et al. // Astron. J. 2003. Vol. 125. P. 707.

В. В. Орлов¹, А. И. Мартынова²

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Санкт-Петербургская лесотехническая академия

ПРОБЛЕМА ТРЕХ ТЕЛ В НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ И АСТРОФИЗИКЕ

Представлен краткий обзор основных результатов аналитических и численных исследований общей задачи трех тел. Обсуждаются приложения этой задачи для исследования динамической эволюции и устойчивости тройных систем в небесной механике и звездной динамике.

We give a short review of main results of analytical and numerical investigations in the general three-body problem. We discuss the applications of this problem to study dynamical evolution and stability of triple systems in celestial mechanics and stellar dynamics.

Введение

Статистический анализ наблюдательных данных показывает, что звезды часто образуют кратные системы (см., например, [1, 2]). Такие объекты могут формироваться изначально в ходе звездообразования или могут являться продуктом распада групп и скоплений звезд (см., например, [3, 4]). Среди кратных звезд, состоящих из трех и более компонент, большую часть составляют тройные звезды.

Численное моделирование динамической эволюции тройных систем представляет интерес, поскольку до сих пор не было найдено приемлемого аналитического решения гравитационной задачи трех тел (см., например, книгу [5]).

В ряде случаев можно рассматривать динамику тройных систем в рамках возмущенной задачи двух тел. Такой подход используется при изучении движений в сильно иерархических тройных системах или в системах с большим различием масс компонент, где применяются разного рода разложения по малому параметру, например по отношению больших полуосей орбит внутренней и внешней двойных в первом случае или по отношению масс компонент во втором.

Существенный прогресс в изучении динамики тройных систем связан с численным моделированием на ЭВМ. Первые работы в этом направлении появились во второй половине 60-х годов прошлого века (см. ссылки в обзоре [6]). За истекшие 40 лет численные эксперименты в гравитационной задаче трех тел позволили получить ряд новых интересных результатов.

Проблема трех тел в небесной механике

В небесной механике обычно рассматривается система трех точечных масс, притягивающихся друг к другу по закону всемирного тяготения. Уравнения движения в этой задаче имеют следующий вид:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = -G \sum_{j=1, j \neq i}^3 \frac{m_j(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3}, \quad (1)$$

где G — гравитационная постоянная; m_j — масса j -й точки; \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j — радиусы-векторы i -й и j -й точек. Система дифференциальных уравнений (1) имеет десять классических интегралов движения: шесть интегралов центра масс, три интеграла площадей и интеграл энергии. Еще Пуанкаре доказал отсутствие дополнительных интегралов в широком классе «хороших» функций.

В начале XX в. Сундман [7] получил аналитическое решение общей задачи трех тел в виде равномерно и абсолютно сходящихся рядов. Ряды Сундмана имеют важное теоретическое значение, однако пока они не нашли практического применения из-за чрезвычайно медленной сходимости.

Первые частные решения общей задачи трех тел были найдены во второй половине XVIII в. Лагранжем и Эйлером. Лагранж получил равновесное решение, когда три тела все время находятся в вершинах равностороннего треугольника и образуют треугольную центральную конфигурацию. Эйлер показал, что равновесные решения возможны и в случае, когда три тела находятся на одной прямой, равномерно вращающейся вокруг общего центра масс.

Ряд качественных результатов получен при изучении финальных движений при $t \rightarrow \infty$. Первая классификация финальных движений предложена Шази (см. ссылки в [8]):

- 1) H — гиперболические движения;
- 2) HP_i — гиперболо-параболические движения;
- 3) P — параболические движения;

- 4) HE_i — гиперболо-эллиптические движения;
- 5) PE_i — параболо-эллиптические движения;
- 6) B — ограниченные движения;
- 7) OS — осциллирующие движения.

Здесь $i = \{1, 2, 3\}$ — номера тел. Взаимное расположение этих подмножеств схематически представлено на рис. 1 [8].

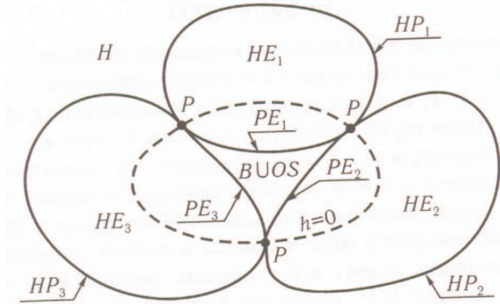


Рис. 1. Графическое представление классификации Шazi согласно Алексееву [8] (h — полная энергия тройной системы)

Дальнейший анализ качественных свойств финальных типов движений в задаче трех тел проведен в работе [9]. Основной вывод этой работы состоит в том, что наиболее важными «вехами» в задаче трех тел являются движения в окрестности тройного соударения, на бесконечности и вблизи периодических орбит. Схематически структура фазового пространства задачи трех тел изображена на рис. 2. Центр круга соответствует тройному соударению тел, точки — лагранжевым движениям, разомкнутые полости — уходам тел на бесконечность. Все множество орбит при заданных значениях интегралов энергии и углового момента располагается в области, ограниченной центральной окружностью и кривыми, уходящими на бесконечность.

Представляют интерес различные варианты переходов при $t \rightarrow \pm\infty$. При положительной полной энергии $h > 0$ оказались осуществимы все пять логически возможных типов эволюций.

В области $h < 0$ ситуация существенно сложнее, чем при $h > 0$. Множества HE_i^\pm открыты и связны, однако каждое из них сильно «разветвлено» в фазовом пространстве, причем отдельные ветви могут переплетаться друг с другом весьма сложным способом. Биркгоф [10] представлял области HE_i^- в виде трех потоков, притекающих из бесконечности. Алексеев [8] продолжает аналогию Биркгофа

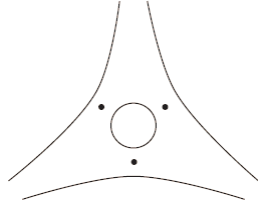


Рис. 2. Структура фазового пространства в задаче трех тел [9]

и представляет, что каждый из потоков разбивается на множество «ручейков», пронизывающих фазовое пространство и собирающихся в три вытекающие потока HE_i^+ . Алексеев показывает возможность существования в области $h < 0$ движений типа «обмен» и движений типа «полный захват». Особенно интересной оказалась возможность полного захвата, когда к двойной системе за счет гравитационного взаимодействия присоединяется третье тело, прилетевшее из бесконечности.

Структура множества ограниченных движений связана с условно-периодическими движениями, изучаемыми в КАМ-теории (см. книгу Арнольда и др. [11]): это множество содержит подмножество положительной меры, состоящее из 5-мерных торов, заполненных траекториями с такими движениями. Условно-периодические движения составляют регулярную часть множества, однако наряду с ними существуют «квазислучайные» движения.

Рассмотрим **сближение трех одиночных тел по гиперболическим орбитам** ($h > 0$). При этом возможны два типа финальных движений:

- 1) гиперболические движения (H^+);
- 2) гиперболю-эллиптические движения (HE^+).

Для оценок вероятности образования двойных при тройных сближениях одиночных звезд (HE^+) можно ввести понятие сферы сближения трех звезд. Радиус этой сферы определяется параметрами звездного поля

$$r = k \frac{G\bar{m}}{\bar{V}^2}, \quad (2)$$

где \bar{m} — средняя масса звезды поля; \bar{V}^2 — среднее значение квадрата модуля остаточной скорости звезды поля; k — безразмерный ви-

риальный коэффициент, равный отношению средней кинетической энергии пекулярных движений звезд поля к модулю характерной потенциальной энергии при сближении трех звезд поля. Величина параметра k характеризует степень тесноты сближения трех одиночных звезд.

Вероятность $P(r)$ формирования двойной убывает с увеличением радиуса сближения r . В работе [12] теоретически показано, что для широких сближений

$$P(r) \propto r^{-2}. \quad (3)$$

Формирующиеся двойные имеют, как правило, сильно вытянутые орбиты — средние эксцентриситеты составляют около 0.8.

В звездном поле Галактики и в звездных скоплениях наблюдаются **двойные звезды**, которые могли сформироваться посредством различных механизмов:

- 1) совместное образование компонентов двойной системы;
- 2) распад малых групп звезд или звездных скоплений;
- 3) сближения трех и более одиночных звезд.

После формирования двойные звезды могут испытывать сближения со звездами поля. Схема возможных сценариев исходов сближений двойных звезд с одиночными (актов гравитационного рассеяния) условно показана на рис. 3. Здесь ϵ_0 и ϵ_1 — начальная и финальная энергии двойной системы. Условие сохранения двойной после сближения со звездой поля имеет вид

$$\Delta = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{\epsilon_0} > -V_0^2, \quad (4)$$

где V_0 — безразмерная начальная скорость одиночной звезды, выраженная в единицах параболической скорости. Стрелки на рисунке показывают возможные переходы между различными типами движений в прошлом и будущем. Величина $V_0^2 + \Delta$ является мерой энергии связи двойной системы, образованной в результате сближения. Если $V_0^2 + \Delta < -1$, то новая двойная теснее, чем начальная. В противном случае новая двойная шире начальной.

Статистически эволюция двойной в звездном поле зависит от отношения модуля ее полной энергии $|\epsilon_0|$ к средней кинетической энергии \bar{T} звезд поля [14]: если $|\epsilon_0|/\bar{T} < 1$ (широкая двойная), то, как

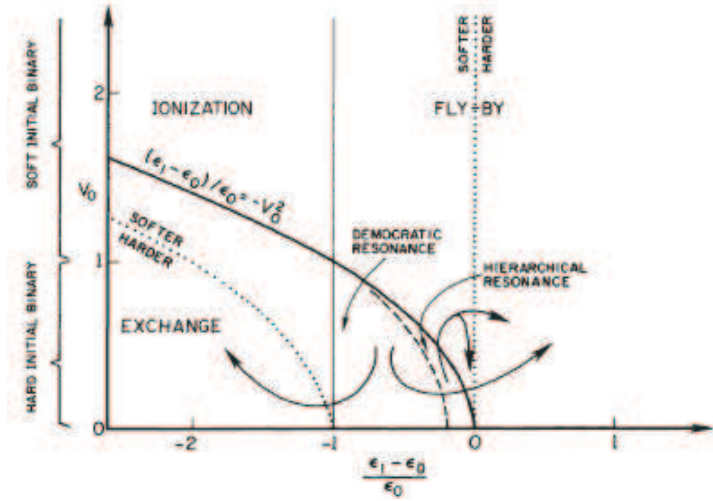


Рис. 3. Классификация сценариев гравитационного рассеяния [13]

правило, за счет сближений со звездами поля двойная становится шире и в конце концов разрушается; при $|\epsilon_0|/\bar{T} > 1$ (тесная двойная) двойная в среднем становится теснее и ее эволюция завершается слиянием компонентов.

Для представления статистических результатов сближений в [15] предлагается использовать аппарат поперечных сечений (cross sections), часто используемый в статистической физике и физике элементарных частиц. Кроме того, свойства процессов ионизации, рассеяния (в том числе резонансного) и перезарядки, изучаемых в ядерной физике, имеют аналоги в гравитационном рассеянии. В [13] был предложен ряд аналитических аппроксимаций для поперечных сечений при больших скоростях подлета.

Заметим, что в звездном поле, находящемся в состоянии диссоциативного равновесия (число формирующихся двойных в единицу времени равно числу разрушающихся двойных), должен выполняться закон Амбарцумяна [16] для распределения эксцентриситетов орбит двойных звезд: $f(e) = 2e$.

Результат отдельного сближения одиночной звезды с двойной зависит от начальной фазы двойной, определяемой, например, истинной аномалией f . В [17] подробно исследована эта зависимость. При фиксированной скорости подлета одиночной звезды с определенного

расстояния R (рис. 4) определяется зависимость исхода X сближения от величины f и прицельного расстояния ρ . Пример такой зависимости приведен на рис. 5. Выделяются области ионизации, пролетов и обменов с одним или другим компонентом начальной двойной.



Рис. 4. Задание начальных условий сближения, согласно работе Хута [17]



Рис. 5. Зависимость результата сближения от (f, ρ) при $V_0 = 2$ [17]. Пробелы соответствуют пролетам, звездочки — ионизации, единицы — обменам звезды поля со звездой 1, штрихи — обменам со звездой 2

Для *тройных систем с отрицательной полной энергией* можно представить два сценария формирования:

- 1) захват звезды поля, сближающейся с тесной двойной системой;
- 2) совместное образование компонентов в результате фрагментации газового облака или распада звездной группы или скопления.

При изучении динамики тройных систем методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) выбор начальных условий для численных экспериментов зависит от рассматриваемого сценария:

- 1) задаются элементы орбиты двойной и параметры прицельного движения звезды поля (имеется иерархия);
- 2) начальная иерархическая структура не предполагается.

Для выбора начальных положений тел во втором случае можно использовать область D всех возможных конфигураций тройных систем [18] (или гомологическую область [19]). Эта область изображена на рис. 6.

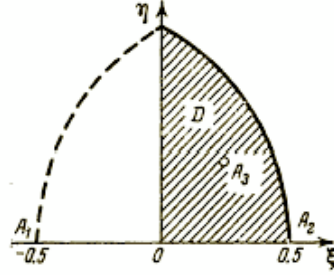


Рис. 6. Область D всех возможных конфигураций тройных систем

Область D заштрихована. Тела располагаются в точках: $A_1(-0.5, 0)$; $A_2(+0.5, 0)$; $A_3(\xi, \eta)$. В работе [18] показано, что для любого треугольника найдется подобный ему треугольник с координатами вершины $A_3(\xi, \eta)$ в области D . Положения точки A_3 на границах области D соответствуют двум предельным случаям задачи трех тел: равнобедренной задаче (дуга окружности и отрезок $[0, \sqrt{3}/2]$ на оси ординат) и прямолинейной задаче (отрезок $[0, 0.5]$ на оси абсцисс). Конфигурации сильно иерархических систем концентрируются в правом нижнем углу области D .

Для возможности сопоставления результатов численного моделирования для тройных систем с различными начальными условиями полезно использовать динамическую систему единиц (см. [18]): единица длины — средний размер тройной системы:

$$d = \frac{G \sum_{i < j} m_i m_j}{2|h|}; \quad (5)$$

единица времени — среднее время пересечения тройной системы:

$$\tau = \frac{G \sum_{i < j} m_i m_j \sqrt{\sum_{i=1}^3 m_i}}{(2|h|)^{3/2}}. \quad (6)$$

Для неустойчивых распадающихся тройных систем Себехей [20] предложил классификацию состояний, в которые система попадает в ходе своей динамической эволюции:

- класс I: взаимодействие (Interplay);
- класс II: выброс без ухода (Ejection without escape);
- класс III: уход (Escape).

Агекян и Мартынова [21] предложили разделить класс I на два:

- класс 0: тройное сближение (Triple Approach);
- класс I: простое взаимодействие (Simple Interplay).

Критерии для определения класса состояния 0, I, II+III в определенный момент времени в тройных системах с $h < 0$ были разработаны в работах [21] и [22].

Сформулируем основные результаты численного моделирования динамики неустойчивых тройных систем (см., например, [23]):

- 1) динамическая эволюция неустойчивых систем завершается распадом — уходом одного из тел по гиперболической орбите и образованием тесной финальной двойной системы;
- 2) как правило, распаду предшествует тройное сближение, причем чем теснее тройное сближение, тем вероятнее, что оно приведет к распаду;
- 3) увеличение различия масс компонентов (в случае сравнимых масс тел) в среднем ускоряет процесс распада, а увеличение момента вращения тройной системы в среднем замедляет эволюцию;
- 4) финальные двойные, как правило, имеют сильно вытянутые орбиты;
- 5) явление распада тройных систем можно рассматривать как случайный процесс, сходный с процессом радиоактивного распада.

Одной из важнейших характеристик процесса распада тройных систем является время жизни. Можно показать [24], что математическое ожидание времени жизни изолированных неустойчивых тройных систем бесконечно велико. В ходе эволюции тройной системы могут происходить еще более далекие выбросы, чем те, которые система испытала раньше. Это приводит к тому, что со временем происходит своеобразное «омоложение» тройной системы.

Время жизни тройной системы и другие ее эволюционные параметры (например, элементы орбиты финальной двойной) сильно зависят от начальных условий тройной системы. В пространстве начальных условий выделяются области регулярности, когда небольшие изменения начальных условий приводят к небольшим изменениям параметров тройной системы, и области стохастичности (или динамического хаоса), когда даже бесконечно малые вариации начальных условий приводят к радикальным изменениям результата эволюции. Явления динамического хаоса характерны для неинтегрируемых динамических систем, к числу таких систем относится и проблема трех тел.

Монахан [25] предложил статистическую теорию распада тройных систем. Эта теория основана на предположении о полной эргодичности фазовой траектории тройной системы в состоянии тройного сближения, предшествующего распаду. Теория Монахана была модифицирована в книге [2]. Предсказания теории распада тройных согласуются с результатами численного моделирования.

Еще один важный аспект динамики тройных систем — проблемы их *устойчивости* или неустойчивости. В теории динамических систем используются различные понятия устойчивости (см., например, книгу [11]). В применении к задаче трех тел различные определения устойчивости рассматриваются в книге [5]. Траектория называется:

- «устойчивой по Лагранжу», если она остается ограниченной для всех будущих и прошлых моментов времени;
- «устойчивой по Пуассону», если она в будущем возвращается бесконечное число раз в произвольную окрестность любого из своих прошлых состояний;
- «устойчивой по Хиллу», если не происходит обмена удаленного компонента ни с одним из компонентов близкой пары;
- «устойчивой по Ляпунову», если достаточно близкое по начальным условиям решение остается в сколь угодно малой окрестности данного решения для любых будущих (или прошлых) моментов времени.

В литературе известен ряд критериев устойчивости тройных систем (см., например, книгу [2]). Первый аналитический критерий устойчивости по Хиллу был получен Голубевым [26]. Голубев исследовал аналоги областей Хилла в общей задаче трех тел и нашел условие, при котором происходит разрыв области, т. е. обмен компонентами в тройной системе становится невозможен. Это условие соответствует коллинеарному решению Эйлера. Условие устойчиво-

сти по Хиллу можно выразить в виде неравенства

$$s = \frac{c^2|h|}{G^2\bar{m}^5} > s_{crit}, \quad (7)$$

где \bar{m} — средняя масса компонентов в тройной системе; c — ее угловой момент; s_{crit} — критическое значение параметра устойчивости s . Оно определяется из решения Эйлера и зависит от отношения масс тел. В случае равных масс $s_{crit} = 25/4 = 6.25$. Заметим, что выполнение условия по Хиллу не гарантирует устойчивости по Лагранжу, так как удаленный компонент может покинуть тройную систему без предшествующего обмена.

Простой эмпирический критерий устойчивости был предложен Токовининым [27]. Он использовал аппроксимации данных наблюдений для иерархических тройных звезд с известными элементами орбит внутренней и внешней двойных. Критерий Токовинина имеет вид

$$\frac{P_{ex}(1 - e_{ex})^3}{P_{in}} > 5, \quad (8)$$

где P_{ex} и P_{in} — орбитальный периоды внешней и внутренней двойных; e_{ex} — эксцентриситет орбиты внешней двойной.

В численных экспериментах были обнаружены тройные системы, устойчивые по Лагранжу, но неустойчивые по Хиллу. Примеры таких систем из [28] показаны на рис. 7. Рисунки приведены во вращающейся с переменной скоростью и пульсирующей системе координат, связанной с одной из пар тел. В этой системе отсчета выбранная пара тел всегда находится на оси абсцисс, и расстояние между компонентами пары фиксировано.

Еще один важный класс орбит в задаче трех тел — *периодические орбиты*. Интерес к периодическим решениям вызван тем, что они представляют собой базис всего множества решений.

В последнее время бурно развиваются топологические методы поиска периодических решений в общей задаче трех тел (см., например, работы Мура [29] и Вандербея [30]). Поиск периодических орбит проводится с помощью минимизации функционала действия. На практике решение обычно представляется в виде отрезка ряда Фурье и решается задача на оптимизацию — определяются начальные условия, соответствующие минимуму этого функционала.

В теории динамических систем известно явление «прилипания». Это явление состоит в том, что фазовая траектория длительное вре-

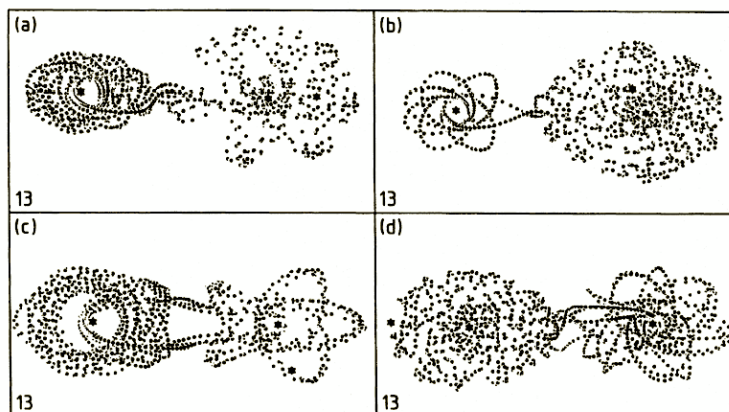


Рис. 7. Неустойчивые по Хиллу, но устойчивые по Лагранжу системы [28]

ма проводит в некоторой ограниченной области вблизи границы хаоса. Такое поведение типа диффузии связано со сложной структурой фазового пространства в окрестности инвариантных торов.

Подобное явление было недавно обнаружено в тройных системах с телами равных масс и нулевыми начальными скоростями [31]. В таких *метастабильных* системах тела значительное время проводят в окрестности периодических орбит (рис. 8 и 9). При этом возможны «перескоки» от одной периодической орбиты к другой.

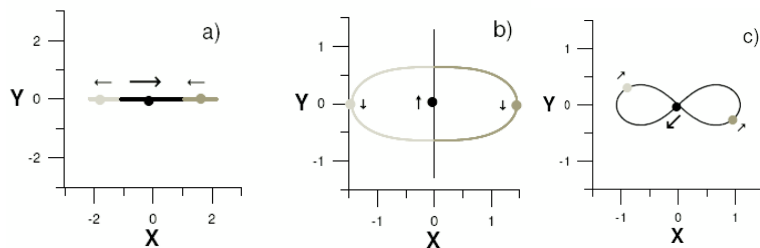


Рис. 8. Простые устойчивые периодические орбиты в задаче трех тел

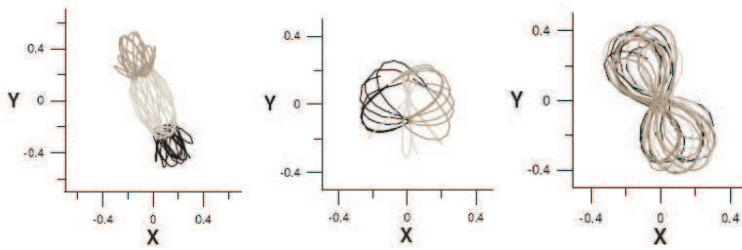


Рис. 9. Метастабильные траектории в окрестности периодических орбит

Проблема трех тел в астрофизике

В предыдущем разделе мы рассматривали результаты, полученные для задачи трех материальных точек. Хотя эта задача имеет очень важное значение для математики и небесной механики, она все же далеко не всегда применима для описания астрофизических систем.

Можно рассмотреть два сценария формирования тройных звезд:

- 1) совместное образование системы, состоящей из трех компонент;
- 2) образование тройной в результате распада группы или скопления звезд.

В результате фрагментации протозвездного газового облака могут формироваться тройные системы с $h < 0$:

- 1) неиерархические системы типа Трапедии Ориона со сравнимыми взаимными расстояниями;
- 2) сильно иерархические системы типа ϵ Лир, в которых одно из взаимных расстояний все время остается много меньше двух других;
- 3) слабо иерархические системы, занимающие промежуточное положение.

Неиерархические тройные звезды должны быть, как правило, неустойчивы. Системы типа Трапедии наблюдаются, как правило, в областях звездообразования, т. е. они имеют небольшой возраст и быстро распадаются. Наблюдаемые в окрестности Солнца сравнительно старые тройные звезды, как правило, имеют сильно иерархическую структуру. Эти системы должны быть динамически устойчивы.

В устойчивых системах с умеренной иерархией и сильно некомпланарными орбитами внешней и внутренней двойных подсистем проявляется известный эффект Лидова—Кодзаи [32, 33]. Этот эффект состоит в том, что эксцентриситет внутренней пары испытывает долгопериодические колебания, причем временами он становится близок к единице. В эти эпохи существенную роль должно играть приливное взаимодействие компонентов близкой двойной, которое приводит к частичной циркуляризации ее орбиты и увеличению тесноты за счет перераспределения энергии и углового момента орбитального движения во внутреннюю энергию и спиновые моменты компонентов. В результате часть устойчивых систем с умеренной иерархией переходит в разряд сильно иерархических систем. Этот механизм косвенно подтверждается наличием пика в распределении периодов мало массивных тесных двойных в интервале от двух до семи суток и резким уменьшением доли систем с большим периодом.

Имеется несколько десятков тройных звезд, для которых выводы о динамической устойчивости или неустойчивости можно сделать более или менее уверенно. Это иерархические тройные системы, для которых известны элементы орбит обеих пар — внутренней двойной, образованной близкими компонентами, и внешней двойной, сформированной удаленной звездой и центром масс близкой пары.

Исследования динамической устойчивости наблюдаемых тройных звезд проводились в ряде работ (см. [34] и ссылки в ней). В [34] для каждой тройной системы определялись значения нескольких параметров устойчивости и критические значения этих параметров, а также относительные запасы устойчивости. Наряду с использованием критериев устойчивости для каждой системы прослеживалась динамическая эволюция в прошлое и будущее в течение $\sim 10^6$ лет. Оказалось, что из 18 рассмотренных систем 12 являются устойчивыми.

Неустойчивые тройные системы имеют меньшую степень иерархии по сравнению с вероятно устойчивыми. Неустойчивость этих систем может быть связана со следующими факторами:

- временный захват звезды поля при ее сближении с тесной двойной;
- разрушение устойчивой иерархической тройной системы в результате ее сближения с массивным объектом поля;
- неустойчивая тройная система является продуктом распада группы или скопления звезд.

Неиерархические кратные звезды, как правило, неустойчивы, поэтому они должны состоять из молодых звезд ранних спектральных классов и звезд типа Т Тельца, еще не достигших главной последовательности. Как правило, в группировках молодых звезд кратные системы встречаются существенно чаще, чем в окрестности Солнца (см., например, [35]).

В последние годы активно проводятся поиски кратных систем среди экстремально молодых протозвездных объектов, погруженных в газовые туманности. Обнаружение таких объектов с возрастaми $\sim 10^4 - 10^5$ лет свидетельствует о том, что кратные системы могут формироваться за очень короткое время после появления зародышей будущих протозвезд. Как правило, такие объекты наблюдаются в инфракрасном, субмиллиметровом и радиодиапазонах. Для разрешения наиболее тесных кратных систем необходимо использовать интерферометрические наблюдения на крупных ИК телескопах и радиоинтерферометрах типа VLA и VLBA.

Анализ обзоров протозвездных объектов показывает, что их функция кратности не зависит от свойств окружения в отличие от звезд типа Т Тельца [35]. По-видимому, сценарий фрагментации ядер облаков не чувствителен к физическим условиям на больших масштабах, однако он зависит от условий на малых масштабах, которые примерно одни и те же во всех протозвездных облаках. Характерные времена разрушения неустойчивых кратных систем протозвезд в наиболее тесных скоплениях составляют $\sim 10^5$ лет.

Детальное изучение орбит компонентов в некоторых тесных кратных протозвездах способно выявить отклонения от кеплеровских траекторий. Так, например, в самой системе Т Тельца Лойнард и др. [36] из 20-летнего мониторинга системы на VLA обнаружили, что один из компонентов, возможно, испытал сближение с двойной и был выброшен. Однако более поздние исследования (см. ссылки в [35]) поставили под сомнение этот результат. Пока не удалось найти орбиту, согласующуюся как с радио-, так и с ИК-наблюдениями.

В последнее время изучение формирования и эволюции кратных систем в областях звездообразования происходит в двух направлениях. С одной стороны, проводятся обширные обзоры молодых звезд и протозвезд, с другой — выполняется численное моделирование динамики таких систем в рамках задачи N тел и SPH-подхода. Дальнейший прогресс в исследованиях физики и динамики кратных

звезд может быть связан как с новыми высокоточными наблюдениями в разных диапазонах длин волн, так и с совершенствованием численного моделирования.

Тройные системы широко представлены не только в мире звезд, но и в мире *галактик* (см., например, [37]). В отличие от тройных звездных систем, где допустима аппроксимация звезд точечными массами, для триплетов галактик необходимо учитывать протяженность структуры компонентов. Кроме того, необходимо учитывать ряд других существенных факторов:

- динамическое трение о межгалактическую среду;
- космологическое расширение;
- приливное взаимодействие при тесных сближениях;
- взаимопроникновение галактик (прохождения и слияния);
- дополнительное влияние вакуума, как расталкивающей галактики субстанции, ускоряющей космологическое расширение.

Сформулируем основные результаты численного моделирования динамики триплетов галактик (см., например, [37]):

1) в отличие от тройных систем точечных масс не происходит далеких выбросов компонентов в результате тройных сближений;

2) частота слияний всех трех галактик в течение $\sim 10 \cdot 10^9$ лет (к современной эпохе) сравнительно невелика ($\sim 10\%$), т. е. имеется широкий класс начальных условий, для которых триплеты галактик устойчивы по отношению к слияниям;

3) распределение финальных конфигураций моделированных триплетов в области D (рис. 6) не противоречит наблюдениям как широких, так и компактных триплетов;

5) наблюдаемые компактные триплеты обладают экстремальными динамическими свойствами — наименьшими характерными размерами и наибольшей дисперсией скоростей;

6) присутствие массивного общего темного гало не является необходимым условием для объяснения наблюдаемых характеристик триплетов галактик; с другой стороны, нельзя исключить наличие таких массивных гало.

В последние годы стали популярны космологические модели с космологическим членом $\Lambda \neq 0$ и холодной темной материей (cold dark matter). В этих моделях фигурирует некоторая дополнительная субстанция — темная энергия (вакуум или квинтэссенция), обладающая отрицательным давлением и «расталкивающая» галактики в группах и скоплениях. Наличие этой субстанции может существенно повлиять на динамику широких групп. Оказалось, что модели без

вакуума редко согласуются с данными наблюдений групп галактик, в то время как модели с учетом вакуума дают хорошее согласие с наблюдениями групп галактик в широком диапазоне параметров.

Заключение

Таким образом, гравитационная проблема трех тел находит широкое применение в различных областях астрономии, таких как небесная механика и звездная динамика. В дальнейшем представляет интерес исследование ряда нерешенных проблем:

- теория резонансных движений в общей задаче трех тел;
- символическая динамика тройных систем;
- поиск аналитических решений в частных случаях задачи трех тел (в частности, в прямолинейной и равнобедренной задачах);
- обобщение метода поиска периодических орбит посредством минимизации функционала действия на трехмерный случай;
- поиск оптимального критерия устойчивости тройных систем, применимого для широкого класса начальных условий;
- исследование топологических связей между областями ограниченных движений в окрестностях устойчивых периодических орбит;
- каталогизация типов периодических и близких к ним орбит.

Список литературы

1. Бэтмен А. Двойные и кратные звезды. М., 1976.
2. Valtonen M., Karttunen H. Three-body problem. Cambridge, 2006.
3. Sterzik M. F., Durisen R. H. The dynamic decay of young few-body stellar systems I. The effect of a mass spectrum for $N = 3, 4$, and 5 // Astron. Astrophys. 1998. Vol. 339. P. 95.
4. Рубинов А. В., Петрова А. В., Орлов В. В. Динамическая эволюция кратных звезд // Астрон. журн. 2002. Т. 79. С. 1044.
5. Маршал К. Задача трех тел. М.; Ижевск, 2004.
6. Аносова Ж. П., Орлов В. В. Динамическая эволюция тройных систем // Тр. АО ЛГУ. 1985. Т. 40. С. 66.
7. Sundman K. F. Mémoire sur le problème des trois corps // Acta Math. 1913. Vol. 36. P. 105.
8. Алексеев В. М. Лекции по небесной механике. Ижевск, 2001.

9. *Moeckel R.* Some qualitative features of the three-body problem // Contemporary Math. 1988. Vol. 81. P. 1.
10. *Биркгоф Дж.* Динамические системы. М.; Л., 1940.
11. *Арнольд В. И., Козлов В. В., Нейштадт А. И.* Математические аспекты классической и небесной механики. М., 2002.
12. *Aarseth S. J., Heggie D. C.* The probability of binary formation by three-body encounters // Astron. Astrophys. 1976. Vol. 53. P. 259.
13. *Heggie D. C., Hut P.* Binary-single-star scattering. IV. Analytic approximations and fitting formulae for cross sections and reaction rates // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1993. Vol. 85. P. 347.
14. *Гуревич Л. Э., Левин Б. Ю.* Об образовании двойных звезд // Астрон. журн. 1950. Т. 27. С. 273.
15. *Hut P., Bahcall J. N.* Binary-single star scattering. I. Numerical experiments for equal masses // Astrophys. J. 1983. Vol. 268. P. 319.
16. *Амбарцумян В. А.* К статистике двойных звезд // Астрон. журн. 1937. Т. 14. С. 207.
17. *Hut P.* The topology of three-body scattering // Astron. J. 1983. Vol. 88. P. 1549.
18. *Агекян Т. А., Аносова Ж. П.* Исследование динамики тройных систем методом статистических испытаний // Астрон. журн. 1967. Т. 44. С. 1261.
19. *Chernin A., Ivanov A., Trofimov A. et al.* Configurations and morphology of triple galaxies: Evidence for dark matter? // Astron. Astrophys. 1994. Vol. 281. P. 685.
20. *Szebehely V.* Classification of the motions of three bodies in a plane // Celest. Mech. 1971. Vol. 4. P. 116.
21. *Агекян Т. А., Мартынова А. И.* О классификации состояний в задаче трех тел // Вестн. Ленингр. ун-та. 1973. Сер. 1. Вып. 1. С. 122.
22. *Мартынова А. И., Орлов В. В.* Критерии тройного сближения и выброса в общей задаче трех тел // Вестн. СПбГУ. 2000. Сер. 1. Вып. 2. С. 132.
23. *Аносова Ж. П.* Численно-экспериментальные методы в звездной динамике // Итоги науки и техники. Сер. Астрон. 1986. Т. 26. С. 57.

24. Агекян Т. А., Аносова Ж. П., Орлов В. В. Среднее время распада тройных систем // *Астрофизика*. 1983. Т. 19. С. 111.
25. Monaghan J. J. A statistical theory of the disruption of three-body systems. I. Low angular momentum // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1976. Vol. 176. P. 63.
26. Голубев В. Г. Об областях невозможности движений в задаче трех тел // *Докл. АН СССР*. 1967. Т. 174. С. 767.
27. Tokovinin A. A. Statistics of multiple stars // *Revista Mex. Astron. Astrofis. (Ser. Conf.)* 2004. Vol. 21. P. 7.
28. Kiseleva L. G., Eggleton P. P., Orlov V. V. Instability of close triple systems with initial doubly-circular motion // *MNRAS*. 1994. Vol. 270. P. 936.
29. Moore C. Braids in classical dynamics // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70. P. 3675.
30. Vanderbei R. J. New orbits for the n-body problem // *Ann. NY Acad. Sci.* 2004. Vol. 1017. P. 422.
31. Martynova A. I., Orlov V. V., Rubinov A. V. Metastability in the evolution of triple systems // *MNRAS*. 2003. Vol. 344. P. 1091.
32. Лудов М. Л. Эволюция орбит искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений внешних тел // *Искусственные спутники Земли*. 1961. Т. 8. С. 5.
33. Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *Astron. J.* 1962. Vol. 67. P. 591.
34. Орлов В. В., Жучков Р. Я. Анализ динамической устойчивости избранных кратных звезд со слабой иерархией // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 231.
35. Duchène G., Delgado-Donate E., Haisch K. Jr. et al. New observational frontiers in the multiplicity of young stars // *Protostars and Planets V*. 2006. astro-ph/0603004.
36. Loinard L., Rodriguez L. F., Rodriguez M. I. Ejection of a low-mass star in a young stellar system in Taurus // *Astrophys. J.* 2003. Vol. 587. P. L47.
37. Aceves H. Dynamical evolution of triplets of galaxies // *MNRAS*. 2001. Vol. 326. P. 1412.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ

Введение

Виртуальная Обсерватория — новая концепция организации доступа к астрономическим данным любого рода и средствам их обработки и анализа с применением современных информационных технологий.

По мере резкого увеличения количества астрономических данных в 90-х гг. прошлого века возникла необходимость стандартизации способов их распространения и обработки. В конце 90-х крупные центры астрономических данных, такие, как CDS (France), CaDC (Canada), STScI (USA) и др. предложили начать разработку стандартов для доступа к астрономическим данным. Основная цель — оптимизировать доступ, обработку и анализ данных для получения максимальной научной отдачи. В 2002 г. был образован Международный Альянс Виртуальной Обсерватории (IVOA, International Virtual Observatory Alliance), объединивший национальные и международные ВО проекты. Главная миссия IVOA — разработка, утверждение и распространение стандартов для всех типов астрономических данных и средств их обработки и анализа, что осуществляется в рабочих группах (Working Groups): Data Models, Data Access Layer, Registry, VO Query Language, VOTable, UCD, Grid & Web Services, VO Event. Дополнительные обсуждения проводятся в группах по интересам (Interest Groups) : Applications, Theory, Data Curation & Preservation, Global Grid Forum interaction.

Основные члены IVOA (в порядке вклада в развитие) — Euro-VO (включает Astrogid, CDS, ESA, ESO и национальные ВО проекты в Европе), NVO или USVO (USA), JVO (Japan), VO-i (India), AusVO (Australia), CVO (Canada) и другие организации. Два раза в год проходят конференции IVOA — Interoperability Meetings, предназначенные для личного общения членов рабочих групп и утверждения стандартов.

Основные результаты, достигнутые средствами виртуальной обсерватории, можно разделить на две основные группы: технологические и научные.

Научные результаты: массовое открытие запыленных квазаров (obscured quasars) [1], массовое открытие звезд на промежуточном этапе между post-AGB и планетарными туманностями [2].

Технические и технологические результаты:

- создание универсального описания различных астрономических данных, представленных в каталогах (Unified Content Descriptors, UCD);
- создание XML-based стандарта для обмена астрономическими данными (VOTable);
- создание стандартных способов доступа к изображениям (Simple Image Access Protocol) и спектрам (Simple Spectral Access Protocol).

Основным результатом для общественности является появление десятков архивов, предоставляющих доступ к данным через стандартные интерфейсы (например, приложение Aladin, разработанное в CDS).

К 2007 г. планируется полный переход крупных архивов (ESO, Gemini, MAST — Multimission archive at Space Telescope, SDSS) на работу с ВО-интерфейсами. Доступ к данным с инструментов следующих поколений на VLT (ESO) будет осуществляться исключительно с помощью средств ВО, поскольку многотерабайтные датасеты довольно проблематично передавать по существующим каналам связи.

История виртуальных обсерваторий

В 2000 г. в США появилась и стремительно завоевала популярность концепция Национальной виртуальной обсерватории (NVO). Ей был присвоен высший приоритет среди так называемых «малых проектов» 10-летнего (2000—2010) астрономического обзора Национальной академии наук США и выделены 10 млн долларов из Национального научного фонда на 5 лет. В проекте «Национальная виртуальная обсерватория» предполагается объединение астрономических баз данных наземных и орбитальных обсерваторий для получения максимального преимущества из последних достижений компьютерных технологий, хранения данных и методов анализа данных. Цель проекта состоит в том, чтобы максимально увеличить

потенциал новых открытий из имеющихся научных данных, сделав их доступными единым унифицированным образом для ученых, астрономов-любителей и студентов. В проекте еще участвуют 17 научных учреждений. NVO рассматривается как существенный шаг в формализации третьего подхода к научному исследованию, которое формировалось в последние годы. Если первый этап научного исследования — построение теоретических моделей, второй — проверка исследования экспериментами, третий — научное исследование с помощью компьютерных методов, который развивается в ответ на лавинообразные объемы данных, которые мы начинаем получать в разных областях науки.

Заявка на европейский проект «Астрофизическая виртуальная обсерватория (AVO)» была подана в феврале 2001 г. в 5-й Рамочную программу Европейского Совета. Трехлетний проект начинается в 2002 г., на его разработку выделено около 4 млн евро. Программа сфокусируется на двух основных научных направлениях: интероперабельность баз данных и новые информационные технологии. В первой стадии проекта участвуют шесть организаций под общим началом Европейской южной обсерватории (ESO). Британский проект AstroGrid (на выполнение проекта выделено 5 млн фунтов) нацелен на создание сети данных (grid-data) для астрономии, которая будет вкладом Великобритании в глобальную виртуальную обсерваторию. AstroGrid финансируется через UK Совет по исследованиям в ядерной физике и астрономии. Проект начат в октябре 2001 г.

Виртуальное в науках о Земле

Ярким примером влияния информационных технологий на развитие фундаментальной науки являются такие программы, как Digital World, e-Science, Электронная Земля.

Современные информационные технологии, а также пришедшие из физики системы GRID активно способствуют развитию фундаментальной науки. В качестве примера использования современных информационных технологий в науке рассмотрим геоинформатику. Департамент труда Соединенных Штатов Америки, анализируя состояние экономики в стране и перспективы развития рынка труда, недавно назвал геоинформатику одной из трех, наряду с нанотехнологией и биотехнологией, наиболее перспективной и динамично развивающейся областью информационных технологий [3].

Исследование геоинформационных цифровых ресурсов проводится в Программе фундаментальных исследований «Семиосфера Электронного образа Земли», определяющей развитие картографической семиотики, семантического моделирования геоданных, Web-семантики.

По сути дела, в этой программе формируется электронный образ Земли: создаются электронные карты, развивается язык карт, накапливаются огромные массивы геопространственных данных. Исследование проблем обмена информацией на Web привело к созданию глобальных инфраструктур геопространственной информации.

В последние годы широкое признание научного сообщества получает концепция «Виртуального управления информацией». Выдвинутая сравнительно недавно парадигма [4] привела к идее построения Виртуального научного центра данных. Рассмотрим реализацию этого проекта нескольких конкретных случаях.

Тенденцию лавинообразного увеличения потока данных в области наук о Земле можно отметить и в геофизике, и в метеорологии. Диапазон и объем данных для проектов с начала 80-х гг. выросли от сотен гигабайт до десятков петабайт.

Например, интенсивные исследования глобального потепления и изменения климата приводят к тому, что коллекции данных UK Met Office (Meteorological Office) в среднем возрастают на 400 GB в день. По прогнозам, в 2005 г. объем коллекций Met Office должен достичь 1 Petabyte.

Для эффективного обмена информацией наряду с Виртуальной обсерваторией создан проект «Виртуальный научный центр данных геофизики плазмы и солнечно-земной физики». Международный консорциум SPASE — Space Physics Archive Search and Extract (<http://www.igpp.ucla.edu/space>) разрабатывается научным сообществом Европы и США. Проект в настоящее время получил поддержку National Science Foundation USA и начал реализовываться; уровень финансирования достигает нескольких миллионов долларов США.

Интенсивное развитие Интернет-технологий и открытых стандартов на программное обеспечение позволяет объединить распределенные по всему миру гигантские цифровые архивы и базы данных, что фундаментально изменит характер исследований космической плазмы, позволит решить проблему доступа к данным и совместного использования данных в Солнечно-Земной физике. На основе сложившейся системы Мировых центров данных ИЗМИРАН разра-

батывает в России Интернет-ресурс научных данных, полученных в ходе реализации проектов по изучению Солнца, межпланетного и околоземного пространства. ИЗМИРАН выдвинул программу создания Виртуального центра геофизических данных [5] — распределенной сети синхронных баз данных и приложений, позволяющих хранить, получать, выбирать и заказывать данные по физическим условиям на Земле, в космическом и межпланетном пространстве и на Солнце.

Виртуальный научный центр в области изучения планет создается NASA (National Aeronautics and Space Administration) — проект PDS (The Planetary Data System). Проект PDS формирует систему on-line архивов, состоящую из нескольких географически распределенных центров, связанных сетью Интернет [6].

Сервисно-ориентированная архитектура для астрономии

По мере резкого увеличения количества астрономических данных в 90-х гг. прошлого века возникла необходимость стандартизации способов их хранения, обработки и доступа к ним. Это стало особенно актуальным, учитывая будущие проекты, которые, основываясь на новых технологиях, ставят новые грандиозные задачи (возникло даже выражение «technology enabled science»). Для сравнения, за 15 лет работы космического телескопа Хаббл было получено 700 000 снимков около 20 000 объектов. При этом ежедневно на землю поступало около 15 Gb информации. Все хранилище оценивается в 25 Tb. Будущие проекты оценивают свое хранилище уже в петабайты при ежедневном наполнении в терабайты! Так, проект «Large Synoptic Survey Telescope» (www.lsst.org), который стартует в 2012 г., планирует получать изображения размером в 3 млрд пикселей и за ночь накапливать около 15 Tb информации. Закладывается хранилище емкостью в 200 Pb с пропускной способностью сети в 10 Gb/sec. Проект НАСА «Solar Dynamics Observatory» (sdo.gsfc.nasa.gov), посвященный мониторингу солнечной активности (запуск в 2008 г.), планирует ежедневно получать около 3 Tb данных.

Кроме того, астрономия активно децентрализуется, т. е. астрономы стремятся хранить данные не в центрах коллективного хранилища, а там где это удобно для их поддержания. Сейчас насчиты-

вается более 10 000 уникальных каталогов, не считая их различных версий, и эта цифра будет только увеличиваться. Публикация новых каталогов, модификация старых требует значительных усилий по стандартизации описания метаданных, регистрации каталогов.

Совершенно очевидно, что старый подход, когда необходимые данные просто скачивались тем или иным способом на компьютер для обработки, совершенно непригоден. Требуется новая технология, которая позволит передавать программы в центры данных, там их исполнять и предоставлять пользователю только результаты. Новый подход требует соглашений о том, как находить ресурсы (центры данных), каким образом и в каком виде эти данные надо передавать, какие программные интерфейсы необходимы для написания программ и какова политика использования ресурсов.

Для организации процесса обработки данных (pipeline), который может быть очень трудоемким, поисковых задач требуется доступ к GRID центрам, что также требует определенных соглашений (см. проект GRIST, <http://grist.caltech.edu>). В ГАИШ МГУ ведется работа по оцифровыванию стеклянной библиотеки, которая содержит наблюдения (пластинки) за 150 лет и является ценнейшим материалом для астрономии. Обработка большого количества снимков (около 100 000) помимо сложной архитектуры хранилища и методов доступа к сканам потребует столь значительных вычислительных ресурсов и времени, что приведет к необходимости использования распределенных вычислительных ресурсов.

Возникла парадоксальная ситуация, когда есть много данных, которыми практически трудно воспользоваться из-за разноречия в описаниях, единицах измерений, протоколов хранения и передачи данных и т. д. Аналогичная картина наблюдается как в других науках (например, физика высоких энергий, биология, метеорология), так и в бизнесе, развитие которого опирается на бизнес-процессы, реализуемые, в частности, с помощью информационных технологий.

Отмечу, что требуется обеспечить прежде всего не интерактивную работу с данными, а программный доступ к ним, чтобы можно было автоматизировать рутинную работу по обработке наблюдений, поиска данных.

Кроме того, помимо необходимости разработки новых программных компонентов, существует большое количество старых программ и систем, которые обслуживают существующие информационные ресурсы, и требуется найти способ их интеграции. Очевидно, что это возможно только при абстрагировании от конкретного устройства

компонент, протоколов связи между ними и формата данных, которыми они обмениваются. В противном случае затраты на подключение новых компонентов к системе потребуют больших финансовых и временных затрат (большинство существующих распределенных информационных систем связаны именно таким способом). Попытки решения задач интеграции в распределенных системах предпринимались и ранее, например, технология CORBA, разрабатываемая в соответствии со спецификациями консорциума OMG (Object Management Group, <http://omg.org/>), чья спецификация версии 1.1 в 1991 г. стала первой серьезной технологией построения распределенных систем, предлагающей реальную независимость от инфраструктуры, сетевых протоколов, операционных систем и языков программирования. (Именно идеи CORBA вдохновили автора и его коллег в 1999 г. на создание технологии Дискавери с использованием middleware, которая использовалась при работе над порталами Трамблер, Астронет, федеральными порталами министерства образования России и других.) Параллельно компания Майкрософт продвигала технологию создания распределенных систем DCOM, разработанную на основе модели COM. Кроме CORBA, DCOM существует технология RMI, поддерживающая вызов удаленных объектов, но только если клиент и сервер являются java-приложениями.

К сожалению, ни одна из перечисленных технологий не решила проблемы. Так, из-за разногласий между различными вендорами, разные реализации CORBA были несовместимы между собой, технология DCOM, несмотря на обещания Майкрософт, так и осталась поддерживающей только ОС Windows.

В то же время в связи с развитием Веба появились Веб-службы (сервисы), которые предложили архитектуру, основанную на слабой связности (loose coupling) между компонентами. Это означает, что компонентам системы не обязательно знать как устроены, взаимодействующие с ними подсистемы, и нет необходимости разрабатывать новые форматы данных и создавать специальное ПО для взаимодействия с ними. Другими словами, все компоненты системы представляют друг для друга «черные ящики». Для Веб-служб важно только то, что используется протокол передачи данных HTTP, которые передаются в формате XML, содержащий сериализованные объекты и способ адресации URI (Unified Resource Identifier). Учитывая, что практически все вендоры приняли и используют спецификации W3C (w3c.org), Веб-сервисы имеют все шансы стать новой технологией распределенных информационных систем. Замечу,

что для интеграции старых систем требуется написать только внешний интерфейс (враппер), который удовлетворял бы описаниям веб-сервиса. Практические задачи могут быть очень сложными и требовать соединения нескольких сервисов, географически и организационно разделенных. Для управления набором сервисов, порядком их выполнения и передачи данных между ними (workflow) разрабатываются спецификации оркестровки (WS Orchestration) и хореографии (WS Choreography) сервисов и язык BPEL4WS для описания оркестровки.

В конце 90-х крупные центры астрономических данных (CDS (Франция), CaDC (Канада), STScI (США) и т. д.) предложили начать разработку стандартов для доступа к астрономическим данным. Основная цель — оптимизировать доступ, обработку и анализ данных с целью получения максимальной научной отдачи. В 2002 г. был образован Международный Альянс Виртуальной Обсерватории (IVOA, International Virtual Observatory Alliance, ivoa.net), объединивший национальные международные ВО проекты. Главная миссия IVOA — разработка, утверждение и распространение стандартов для всех типов астрономических данных и средств их обработки и анализа.

За последние годы рабочими группами IVOA были разработаны рекомендации: универсальное описание различных астрономических данных, представленных в каталогах (Unified Content Descriptors, UCD), создание основанного на XML стандарта для обмена астрономическими данными (VOTable), создание стандартных способов доступа к изображениям (Simple Image Access Protocol) и спектрам (Simple Spectral Access Protocol). Основным результатом для общественности является появление десятков архивов, предоставляющих доступ к данным через стандартные интерфейсы (например, приложение Aladin, разработанное в CDS).

Виртуальная Обсерватория — это новая концепция организации доступа к астрономическим данным любого рода и средствам для их обработки и анализа в современной эре развития информационных технологий. С технологической точки зрения Виртуальная Обсерватория есть сервисно-ориентированная архитектура для астрономии.

На сегодняшний день в технологической структуре ВО можно выделить три основные части:

1. Серверы каталогов (узлы ВО) и требования к ним:
 - стандарты представления данных и обмена ими (протоколы);

- единый язык запросов к астрономическим базам данных (ADQL);
 - требования к серверам каталогов (узлам ВО) для работы в рамках ВО;
2. Глобальная инфраструктура ВО:
- распределенная обработка запросов;
 - оптимизация выполнения запросов (еще не разработано);
 - репликация каталогов и баз данных;
 - глобальный реестр каталогов;
3. Средства доступа к ВО ориентированные на пользователей и на программы-роботы:
- интерфейсы доступа (API) к данным и сервисам ВО для программ-роботов;
 - ориентированный на человека язык запросов (VOQL, еще не разработан);
 - приложения пользовательского уровня для доступа к ВО (программные и web-интерфейсы).

Проект создания Российской Виртуальной Обсерватории (РВО, <http://www.inasan.ru/rus/rvo/>) начал осуществляться в 2002 г., однако никаких результатов в рамках РВО получено не было, что частично объясняется как слабой информированностью Российского астрономического сообщества относительно целей и задач ВО в целом и РВО в частности, так и недостаточной технологической базой на данный момент.

В рамках проекта Астронет (www.astronet.ru) уже создан полностью рабочий прототип узла Виртуальной обсерватории SAI CAS (vo.astronet.ru), который является первым (и единственным) в России и СНГ реально работающим центром доступа ко всем крупнейшим астрономическим каталогам (несколько миллиардов объектов). Все ресурсы уже зарегистрированы в международных реестрах и доступны как ресурсы ВО. Отметим, что SAI CAS является открытым проектом, в его работе принимают участие сотрудники разных институтов, и технология реализована с помощью только открытых технологий (PostgreSQL, Apache, Axis, Java, PHP) и оригинальных алгоритмов работы с очень большими астрономическими каталогами, что важно для его клонирования в других местах. Более подробно этот проект будет представлен в другом докладе.

Применение и развитие сервисно-ориентированной архитектуры в науке является важнейшим фактором развития российской науки, так как позволяет находить, публиковать и обмениваться данными в распределенном мировом хранилище информации, что позволяет решать новые, ранее недоступные задачи. Учитывая нынешнее состояние наблюдательной базы в России, приобщение к ресурсам Виртуальной Обсерватории является необходимым фактором выживания российской астрономии.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за многолетнюю поддержку исследований (гранты 05-07-90225-в, 06-07-89182-а).

Список литературы

1. *Padovani P., Allen M. G., Rosati P. et al.* Discovery of optically faint obscured quasars with Virtual Observatory tools // *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 424. P. 545.
2. *Solano E.* et al. (In preparation).
3. *US Department of Labour* // *Nature*. 2004. Vol. 427. № 1.
4. *Antikidis J. P.* Virtual Access to Information: an emerging concept // In *Proceedings of Workshop PV-2004 Ensuring the Long Term Preservation and Adding Value to the Scientific and Technical Data*. 2004. P. 63.
5. *Ишков В. Н., Кузьмин И. А., Харин Е. П.* Национальный виртуальный центр геофизических данных // *Электронные библиотеки: Перспективные методы и технологии, электронные коллекции*: Тр. Шестой Всерос. науч. конф. 2004. С. 17-21.
6. *Hughes S., Crichton D., Crichton G. et al.* A Planetary Data System for the 2006 Mars Reconnaissance Orbiter Era // *Proc. of Workshop PV-2004 Ensuring the Long Term Preservation and Adding Value to the Scientific and Technical Data*. 2004. P. 263.

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ИНТЕГРАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИК

Метод эволюционного синтеза

Только в самых близких галактиках мы можем (при определенных усилиях) разглядеть и измерить отдельные звезды. Для подавляющего же большинства галактик доступны измерениям только интегральные характеристики — интегральный цвет или интегральная светимость всей галактики или какой-то ее части. Интегральная светимость представляет собой сумму светимостей всех звезд, из которых состоит галактика (или исследуемая часть галактики). Поэтому, чтобы промоделировать интегральную светимость галактики, надо сложить светимости составляющих ее звезд. Можно сделать это «в лоб»: смешать в определенных пропорциях звезды *OB*-класса, *F*-класса, *G*-класса, *K*-класса и *M*-класса, карликов и гигантов. Но в каких пропорциях? Это «модельеры» пытаются определить, сравнивая свой модельный результат с наблюдательными данными. В чистом виде такая «обратная задача» математически некорректна и не имеет единственного решения. Можно попытаться наложить на решение ряд априорных ограничений, например, что число звезд любого типа должно быть неотрицательно. Как показал опыт, это приводит к существенному усложнению задачи, но не снимает вырождения. Поэтому после пары десятилетий борьбы такой «лобовой» популяционный синтез уступил место более физичному *эволюционному синтезу звездных населений*.

Основная идея эволюционного синтеза состоит в том, что суммируются не светимости отдельных классов звезд, а светимости звезд различных масс и возрастов:

$$L_{\lambda,gal} = \int_0^T \int_{M_{min}}^{M_{max}} L_{\lambda,*}(M, \tau) N_*(M, \tau) dM d\tau.$$

Верхний предел интегрирования по возрастам звезд — это, естественно, возраст галактики: тут мы считаем, что галактика образовалась тогда, когда в ней родились самые первые звезды. Пределы интегрирования по массам звезд берутся обычно несколько произвольно, например, $M_{min} = 0.1 M_{\odot}$, $M_{max} = 60\text{--}100 M_{\odot}$; но, как показал опыт, на результаты моделирования они сильно не влияют. Что касается светимости звезды массы M и возраста τ , то она рассчитывается из теории эволюции звезд, поэтому сам метод и называется «эволюционным синтезом». Теория эволюции звезд обеспечивает расчет эволюционного трека звезды массы M на диаграмме (L_{bol}, T_{eff}) , если задан начальный химический состав звезды, (X, Y, Z) ; X — относительное (по массе) содержание химического элемента водорода, Y — содержание гелия и Z — содержание всех химических элементов тяжелее гелия; для краткости их называют «металлами». Параметр Z , будучи самым маленьким из трех, тем не менее оказывает основное влияние на эволюцию звезды, так как контролирует прозрачность ее атмосферы; солнечному химическому составу соответствует $Z = 0.02$. Примерный ход эволюции светимости и температуры (цвета) звезд хорошо известен: 90 % своей жизни, пока в ядре горит водород, звезда «сидит» на главной последовательности, затем, когда образуется гелиевое ядро и водород горит уже вокруг него, в слоевом источнике, звезда довольно быстро поднимается вдоль ветви гигантов, на ее вершине в момент загорания гелия («гелиевая вспышка») сбрасывает верхние слои своей атмосферы и скатывается на голубую (если звезда была маленькая и/или бедная металлами) или красную (если звезда помассивнее и пометалличнее) горизонтальную ветвь. Дальнейшие стадии эволюции — асимптотическая ветвь гигантов (AGB), постасимптотическая и протопланетарная стадии — очень быстры и наступают по мере загорания и исчерпания все более тяжелых элементов в ядре звезды. Конечный продукт эволюции звезды зависит от ее начальной массы: звезды с начальной массой меньше $8 M_{\odot}$ превращаются после всех своих потерь в белый карлик с массой $0.6\text{--}0.7 M_{\odot}$, звезды с начальной массой больше $8 M_{\odot}$ превращаются в нейтронную звезду с массой $1.4 M_{\odot}$, а самые массивные, массивнее $40\text{--}60 M_{\odot}$, вполне возможно, в конце концов коллапсируют в черную дыру. Вклад тех или иных стадий эволюции звезд в интегральную болометрическую светимость звездной системы (галактики) определяется балансом между светимостью звезды на этой стадии и длительностью ее пребывания там. Переход от болометрической светимости звезд, которая берется из теоретических

расчетов эволюционных треков, к наблюдаемой величине — монохроматической светимости, соответствующей конкретной длине волны в спектре или конкретному спектральному диапазону (фотометрической полосе), осуществляется с помощью T_{eff} и однозначно зависящих от нее болометрических поправок. Начальная металличность звезд, определяющая систему эволюционных треков для некоторого дискретного набора начальных звездных масс, является одним из главных параметров модели эволюционного синтеза интегральной светимости галактики и, как правило, фиксируется.

Другие главные параметры модели «защиты» в нормирующем коэффициенте $N_*(M, \tau)$ — числе звезд массы M и возраста τ в галактике. Обычно при моделировании переменные разделяют: $N_*(M, \tau) \equiv IMF(M) \cdot SFR(T - \tau)$, где IMF (Initial Mass Function) — начальная функция масс звезд (распределение звезд по массам в каждом вновь рождающемся поколении) и $SFR(t)$ (Star Formation Rate) — глобальная история звездообразования в галактике. Такое разделение переменных предполагает, что IMF не эволюционирует со временем, — это упрощающее предположение. Что касается наших эмпирических представлений об IMF , то у них счастливая судьба: они практически не менялись последние 50 лет. Эдвин Солпитер [1] измерил IMF по относительно небольшой выборке звезд в окрестностях Солнца в интервале масс $1-10 M_\odot$; у него получился степенной закон $dN_*/dM \propto M^{-2.35}$. Как ни пытались с тех пор на больших выборках и более рафинированными методами уточнить этот результат, он устоял практически в исходном виде. Похоже, закон Солпитера имеет в основе какую-то фундаментальную физику звездообразования. Довольно часто используется также при моделировании начальная функция масс звезд из работы Miller & Scalo [2], которая круче, чем солпитеровская, на больших массах и положе на очень маленьких, однако надо признать, что конечный продукт эволюционного синтеза в оптическом диапазоне практически не меняется, берете вы чисто солпитеровскую IMF или ее модификацию Miller & Scalo. В самом общем случае при эволюционном синтезе используют $IMF \propto M^{-\alpha}$, где α — параметр модели.

Что касается глобальной истории звездообразования, $SFR(t)$, то исторически сложилось так, что ее параметризуют экспонентой: $SFR \propto \exp(-t/\tau)$, где τ — характерное время трансформации газа в звезды (параметр модели). Почему именно экспонентой? В самой простой модели, если система замкнутая, газ протогалактики постепенно исчерпывается, переходя в звезды, и из физического здравого

смысла следует, что интенсивность звездообразования в галактике должна монотонно убывать со временем. Также почти 50 лет назад, исследуя звездообразование в окрестностях Солнца и сопоставляя его интенсивность с наличием в данном месте нейтрального водорода, Шмидт [3] вывел эмпирическую зависимость: $SFR \propto \rho^2$. Этому закону повезло лишь немногим меньше, чем закону Солпитера: по современным уточненным оценкам [4], $SFR \propto \Sigma^{1.44}$, где Σ — уже поверхностная, а не объемная плотность газа, т. е. та, что непосредственно наблюдается в других галактиках. Если упростить эту степенную зависимость до линейной и вместо плотности газа подставить его полную массу, что правомерно в замкнутой системе, то получим

$$-dM/dt = SFR = M/\tau;$$

а это уравнение интегрируется аналитически:

$$M = M_{tot} \exp(-t/\tau)$$

и соответственно

$$SFR = \frac{1}{\tau} M_{tot} \exp(-t/\tau).$$

Отсюда и экспоненциальный закон убывания глобальной интенсивности звездообразования в моделях галактик. На самом деле, как показала практика моделирования, точный функциональный вид $SFR(t)$ не важен — важно отношение современных темпов звездообразования в галактике к средним за время ее жизни и характерное время образования полного звездного населения галактики τ . Существуют такие галактики, в которых современные темпы звездообразования превышают среднее за все время жизни; такие галактики называются галактиками со вспышкой звездообразования, или по-английски «star bursts».

Развитие метода эволюционного синтеза

Метод эволюционного синтеза интегральных светимостей и цветов (спектров) галактик придумала Беатрис Тинсли в конце 60-х гг.; это была тема ее научной работы. Как довольно часто случается, эпохальное изобретение было сделано в процессе решения совсем другой проблемы: шеф поставил перед Тинсли задачу уточнить космологические параметры, в частности, параметр замедления расширения Вселенной, промоделировав диаграмму Хаббла $m(z)$ для слабых далеких галактик. Когда метод был разработан и опробован,

оказалось, что задачу, поставленную шефом, решить нельзя: результаты моделирования оказались куда более чувствительны к деталям эволюции галактик, тогда неизвестным, чем к геометрии Вселенной. И Тинсли занялась эволюцией галактик. Ее первые модели были еще крайне несовершенны: эволюционные треки звезд были тогда просчитаны только до основания ветви гигантов, и в самой своей первой работе [5] Тинсли к теоретическим изохронам возраста 12 млрд лет вынуждена была «пристегивать» наблюдаемую ветвь гигантов из старых рассеянных скоплений диска, NGC 188, М 67 и др.

Теперь-то мы знаем, что самые старые рассеянные скопления намного моложе 12 млрд лет, но у Тинсли не было другого выхода: в ее моделях был зафиксирован солнечный химический состав, и ветви гигантов, например из шаровых скоплений, ей не годились. И тем не менее, несмотря на «примитивность» этих первых моделей, Тинсли, используя их результаты, сразу же сделала несколько эпохальных открытий. Так, на двухцветной диаграмме ($U - B, B - V$) распределение цветов близких галактик самых разных морфологических типов, представляющее собой довольно узкую ленту, совпало с модельной последовательностью, полученной при фиксации всех модельных параметров (включая возраст галактик 12 млрд лет), кроме параметра темпов звездообразования τ . Тинсли немедленно сделала вывод, что все галактики вокруг нас имеют примерно одинаковый, старый возраст и различаются лишь современными темпами звездообразования: красный цвет эллиптических и линзовидных галактик получается при практическом отсутствии звездообразования в настоящую эпоху ($\tau = 1$ млрд лет), а голубой цвет галактик самых поздних морфологических типов, Sd—Sm и Irr, — если звездообразование шло с примерно постоянной интенсивностью все время жизни галактики ($\tau \rightarrow \infty$). Цвета спиральных галактик более ранних типов получаются при промежуточных значениях τ : для Sa берут $\tau \approx 3$ млрд лет, для Sb — $\tau \approx 5$ млрд лет, а для Sc — $\tau \approx 10$ млрд лет. Другая эпохальная идея, активно эксплуатируемая до сих пор, высказана в статье Larson & Tinsley [6]: они обратили внимание, что галактики Арпа [7], в большинстве своем взаимодействующие, на двухцветной диаграмме сдвинуты (рассеяны) по цвету $U - B$ в голубую сторону относительно последовательности цветов нормальных галактик. В эту область двухцветной диаграммы модель может по-

пасть, только если испытывает вспышку звездообразования. Значит, взаимодействие галактик стимулирует именно вспышки звездообразования — временное усиление его темпа до уровня выше среднего за всю предыдущую жизнь галактики.

Со времен Тинсли метод эволюционного синтеза был значительно усовершенствован и детализирован благодаря как развитию теории звездной эволюции и продлению эволюционных треков звезд до самых поздних стадий, так и расширению вычислительных возможностей современных компьютеров. Подробное и внятное описание современного подхода к эволюционному синтезу можно найти у Charlot & Bruzual [8]. Они выделяют два типа подходов: «привычный» («conventional») и основанный на теореме о сжигании топлива. Подходы различаются методами построения теоретических изохрон звездных населений на диаграмме цвет—светимость.

«Привычный» подход предполагает такой переход от эволюционных треков звезд различных масс к изохронам звездных систем различных возрастов: на каждом эволюционном треке для звезды массы m_i отмечается точка, соответствующая заданному возрасту t , и далее все эти точки для всех m_i соединяются на диаграмме цвет—светимость плавной кривой, т. е. производится интерполяция по массам звезд и таким образом получается изохрона для звездной системы возраста t . Трудность здесь состоит в том, что наборы масс звезд m_i , для которых имеются эволюционные треки, сильно дискретны; это приводит к тому, что при интерполяции по массам могут «выпадать» эволюционные стадии из числа быстропроходимых. Вот характерный пример. Звезда массы $1 M_{\odot}$ достигает вершины ветви гигантов в возрасте 9 млрд лет, а звезда массы $0.8 M_{\odot}$ — в возрасте 17 млрд лет. Если у вас нет эволюционных треков, промежуточных между $1 M_{\odot}$ и $0.8 M_{\odot}$ масс и если вы взяли бы рассчитать изохрону возраста 13 млрд лет, когда звезды массой $1 M_{\odot}$ уже вымерли, а звезды массой $0.8 M_{\odot}$ еще сидят на главной последовательности, то при интерполяции по массам с верхним пределом интерполяции $0.8 M_{\odot}$ у вас получится изохрона вообще без ветви гигантов, что конечно неправильно и чего не бывает в природе: у звездной системы возраста 13 млрд лет должна быть ветвь гигантов, населенная звездами массой примерно $0.9 M_{\odot}$. Из-за непонимания этой тонкости многие западные модели, опубликованные до 1990 г. (см., например, [9, 10]) страдают искусственной немонотонностью эволюции цвета на больших возрастах: в синтезированных звездных населениях близких возрастов т. е. красные гиганты, то они «упущены»,

и тогда модель голубее, чем должна быть на самом деле. Charlot & Bruzual [8] решают эту проблему, введя еще один промежуточный этап расчета между эволюционными треками и изохронами: они разделяют каждый эволюционный трек на 155(!) эволюционных стадий и предварительно интерполируют по массам внутри каждой эволюционной стадии, «размножая» таким образом многократно количество эволюционных треков звезд промежуточных масс. Тогда изохроны получаются гладкими и полными. Вдоль каждой изохроны возраста t в области главной последовательности меняется масса населяющих каждый участок звезд; поэтому каждой точке изохроны приписывается «населенность» (вес), пропорциональная начальной функции масс. А вот яркие части изохроны, начиная с точки поворота главной последовательности, населяют звезды примерно одной начальной массы, поэтому их общее количество, определяемое IMF , распределяется вдоль ветви гигантов, горизонтальной ветви, асимптотической ветви гигантов и т. д. пропорционально времени, проводимому звездой этой массы в каждой эволюционной стадии. После получения теоретических изохрон разных возрастов на диаграмме цвет—светимость и приписывания населенностей каждой точке изохроны, эволюционный синтез осуществляется согласно основному интегралу: интегрирование взвешенных светимостей звезд вдоль каждой изохроны есть интегрирование по массам звезд, оно дает светимости звездных поколений разных возрастов (их еще называют «простые звездные населения», Simple Stellar Populations или SSP). Далее светимости поколений звезд можно складывать с весами, пропорциональными $SFR(t)$, и это будет интегрирование по возрастам звезд.

Теорема о сжигании топлива, сформулированная Альвियो Рензини (A. Renzini) и усовершенствованная Алессандро Бузони (A. Buzzoni), более упрощенно трактует «яркие» части изохрон. Она гласит: «Вклад звезд в любой эволюционной стадии после главной последовательности в интегральную болометрическую светимость поколения звезд пропорционален количеству ядерного топлива, сжигаемого звездами в течение этой стадии». При этом изохрона на диаграмме цвет—светимость «дорисовывается» выше точки поворота эволюционным треком массы, равной массе звезды, находящейся в этот момент в точке поворота. Населенности вдоль этой дорисованной части изохроны распределяются пропорционально той части общей массы звезд в продвинутых стадиях эволюции, $m_{to}IMF(m_{to})$, которая «сжигается» на каждой стадии эволюции. Такой подход не требу-

ет детальных интерполяций, перегружающих расчет «привычным» методом. Однако очевидно, что он все-таки является упрощенным, и до сих пор возможные ошибки, связанные с этой упрощенностью, детально не проанализированы.

Некоторые не вполне решенные проблемы эволюционного синтеза

Поздние стадии эволюции звезд

Когда спутник IUE измерил первые ультрафиолетовые, на длинах волн короче 2000 Å, спектры эллиптических галактик, у специалистов по эволюционному синтезу наступил шок: распределение энергии в спектре, монотонно убывавшее с уменьшением λ в голубом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне, на длинах волн меньше 1500 Å вдруг начало бодро расти в коротковолновую сторону. Откуда этот ультрафиолетовый избыток, этот «upturn», как говорят наши западные коллеги? Ведь предполагалось, что эллиптические галактики состоят из оранжево-красных карликов и красных гигантов, у которых в далеком ультрафиолете вообще ничего нет. Сначала решили, что это остаточное звездообразование — маленькое количество молодых массивных ОВ-звезд. Но потом, после открытия ряда странных корреляций (например, ультрафиолетовый избыток в спектрах эллиптических галактик коррелирует с индексом магния, т. е. с металличностью!), общественное мнение склонилось к тому, что это мы видим проявление неучтенных в эволюционном синтезе самых поздних стадий эволюции маломассивных звезд. Как раз примерно в это время в старых шаровых скоплениях были обнаружены немногочисленные звезды «голубого продолжения горизонтальной ветви». Насчет эволюционного статуса этих звезд вроде бы все согласились, что это звезды после гелиевой вспышки (после вершины ветви гигантов), потерявшие особенно много массы — практически все свои верхние водородные слои. Такие звезды, по расчетам, уже не могут увеличить свою светимость и попасть на асимптотическую ветвь гигантов; они тихо сворачивают «налево», в ядра планетарных туманностей. Их называли «AGB-manqué», т. е. пренебрегшие или лишившиеся (стадии) асимптотической ветви гигантов. Если в старое, богатое металлами звездное население эллиптических галактик подмешать 5 % звезд «голубого продолжения горизонтальной ветви» и «AGB-manqué», получится как раз такое распределение энергии

в спектре, какое наблюдается. Проблема только в том, что теория этих поздних стадий эволюции звезд разработана пока недостаточно и длительности их известны весьма приблизительно, так что 5 % — это чисто подгоночная, «потолочная», физически не обоснованная цифра. Не очень ясно вообще, как на эти стадии попадают звезды, почему одни звезды теряют на ветви гигантов меньше массы, а другие больше.

Вырождение эффектов возраста и металличности

Еще в серии статей начала 80-х ([12, 13, 14]) мы отмечали и пытались обратить внимание всех заинтересованных исследователей, что качественно и возраст, и металличность звездного населения галактики одинаково влияют на интегральный цвет и спектр: и при уменьшении среднего возраста звездного населения, и при уменьшении металличности цвет голубеет, линии металлов в спектре ослабевают, а линии водорода усиливаются. Если вы имеете на руках только одну характеристику, вам никогда не разделить эффекты возраста и металличности: галактика может быть голубой при солнечном химическом составе, если в ней много молодых звезд, но точно такой же голубой цвет можно получить для старого, обедненного металлами звездного населения. И даже если вы измерили две фотометрические характеристики, скажем два цвета, это не всегда вам поможет. Известно, например, что на двухцветной диаграмме ($U - B$, $B - V$) Sc-галактики с их солнечным химическим составом и бурным звездообразованием занимают ту же область, что и самые бедные металлами ($[Fe/H] \approx -2$) шаровые скопления нашей Галактики — очень старые, пассивно эволюционирующие звездные системы: и те, и другие имеют $B - V \approx 0.6$ и $U - B \approx 0.0$. Чтобы разделить эффекты возраста и металличности, надо подобрать две спектрально-фотометрические характеристики так, чтобы их чувствительность к эффектам возраста и металличности была различной. В свое время ([13]) я предлагала сопоставлять индекс (эквивалентную ширину) линии магния $Mg\text{Ib}\lambda 5175$ и цвет $B - V$. В последние годы, во многом благодаря усилиям Гая Уорси (Guy Worthey), особую популярность приобрели диаграммы, по одной оси которых откладываются индексы (эквивалентные ширины) линий металлов, например $Mg\text{b}$ или $Fe5270$, а по другой — индексы (эквивалентные ширины) линий водорода, H_β , H_γ или H_δ (естественно, водородных линий поглощения, которые относятся к звездам, а не эмиссионных линий, которые

относятся к газу). На таких диаграммах последовательности равного возраста и последовательности равной металличности звездного населения, рассчитанные с помощью эволюционного синтеза, имеют существенно разный наклон; пересекаясь, эти два семейства линий образуют своеобразную координатную сетку. Поместив внутри этой сетки свои измерения индексов металлов и водорода для какой-то конкретной галактики, вы сможете одновременно оценить и средний возраст, и среднюю металличность звездного населения этой галактики (или этой области галактики). Так можно снять вырождение эффектов возраста и металличности.

Космическая история звездообразования

В общем случае в интегральную светимость галактики вносят вклад звезды разной массы и разного возраста. Однако опыт эволюционного синтеза спектров галактик позволил в конце концов выбрать длины волн, на которых в интегральное излучение вкладывают практически только массивные, а следовательно молодые, звезды. Интегральные светимости галактик на этих длинах волн прямо пропорциональны количеству молодых звезд в галактике, или, другими словами, современной интенсивности звездообразования. Среди этих длин волн в первую очередь следует назвать $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ — длину волны эмиссионной линии H_α .

Как известно, массивные звезды, $M > 10 M_\odot$, ионизуют вокруг себя водород в протяженных зонах Стремгrena; в ходе каскадной рекомбинации этот ионизованный газ излучает, в частности, бальмеровскую серию эмиссионных линий в оптической области спектра. Если вы видите в спектре галактики (области галактики) эмиссионную линию H_α , надо сначала убедиться, что она возбуждается именно молодыми звездами, а не ударной волной и не активным ядром; для этого есть простые диагностики, основанные на соотношениях интенсивностей эмиссионных линий разного потенциала возбуждения. Т. е. если в вашем спектре $I(H_\alpha)/I([NII]\lambda 6583) \geq 2$, то смело можете по светимости галактики в линии H_α определять интенсивность звездообразования.

Эволюционный синтез дает следующую нормировку: $SFR = 7.9 \cdot 10^{-42} L_{H_\alpha}$ эрг/с, в массах Солнца в год [15], правда, она рассчитана для солнечной металличности, солпитеровской начальной функции масс звезд и в предположении полного поглощения лаймановского континуума молодых звезд в непосредственно окружающем их

газе. Аналогично если вы априори знаете, что в галактике достаточно интенсивное звездообразование, можно определять его текущий темп по ультрафиолетовой светимости галактики (на длинах волн короче 3000 Å тоже светят ярче всех массивные ОВ-звезды) или по светимости галактики в далеком инфракрасном диапазоне, $\lambda \sim 50 - 100$ мкм. Что касается последней, то надо, конечно, понимать, что сами ОВ-звезды в этом диапазоне ничего не вкладывают, при их-то голубом цвете; зато, если их много, они заметно нагревают пыль, вместе с газом содержащуюся в областях звездообразования, и вот уже пыль, нагретая до сотни градусов, излучает в далеком инфракрасном диапазоне. Эволюционный синтез [4] дает следующую связь ультрафиолетовой и FIR-светимости с интенсивностью звездообразования: $SFR = 1.4 \cdot 10^{-28} L_\nu$ эрг/с, в массах Солнца в год, где L_ν суммируется в интервале длин волн 1500—2800 Å, или $SFR = 4.5 \cdot 10^{-44} L_{FIR}$ эрг/с, в массах Солнца в год, где $L_{FIR} \approx 1.89 \cdot [2.58 f_\nu(60) + f_\nu(100)]$. Последняя формула опять же предполагает солнечную металличность галактики.

Замечательным свойством прямой пропорциональности полной ультрафиолетовой светимости звездной системы текущей интенсивности звездообразования в ней воспользовались Пьетро Мадау с соавторами [17, 18], и причем так эффектно, что резонанс в научном мире не стихает до сих пор. Мадау не стал связываться с индивидуальными галактиками или даже с отдельными типами галактик, он вычислил суммарную интенсивность звездообразования во всей Вселенной сразу, причем отдельно на разных красных смещениях. Та кривая $SFR(z)$, которую он при этом нарисовал, стала называться «космической историей звездообразования». На $z \approx 1$ $\lambda_0 = 2800$ Å сдвигается на $\lambda_z = 5600$ Å (фильтр V!), а на $z \approx 2$ $\lambda_0 = 1500$ Å — на $\lambda_z = 4500$ Å (фильтр B!); таким образом, ультрафиолетовая светимость измеряется в ходе наземных наблюдений.

Мадау, Поцетти и Дикинсон [18] собрали вместе результаты наземных глубоких обзоров красных смещений галактик, где определялась объемная плотность светящегося вещества галактик (звезд) на разных z от 0 до 1 — подсчитывались галактики различной светимости в фильтрах $UBVRIC$. Для больших z использовались результаты подсчетов галактик в глубоких хаббловских полях. Далее суммарная объемная плотность ультрафиолетовой (в лабораторной системе длин волн) светимости звезд делилась на известный коэффициент — и вот вам $SFR(z)$. Свою «историю космического звездообразования» Мадау, Поцетти и Дикинсон [18] проверили и по результатам обзо-

ров галактик в ближней инфракрасной области спектра. Дело в том, что и расчеты эволюционного синтеза, и прямые наблюдения показывают, что интегральное $M/L_K \approx 1$ в галактиках самых различных типов, с самыми разными историями звездообразования. Это значит, что, исследуя суммарную объемную плотность светимости звезд в фильтре K , вы на самом деле измеряете плотность интегральной массы всех звезд, а она равна $(0.7 \div 0.8) \int_0^{t(z)} SFR(\tau) d\tau$; т. е. измерив по ультрафиолету некую $SFR(z)$, всегда можно ее проверить, проинтегрировав от Большого Взрыва к данному z и сравнив результат интегрирования с объемной плотностью суммарной массы звезд. Мадау с соавторами именно это и проделали и нашли полное согласие. А космическая история звездообразования у него получилась любопытная: она имеет максимум на $z \approx 1.5$, к современной эпохе интенсивность звездообразования в единице объема падает почти на порядок величины, и также она падает в сторону увеличения красных смещений, хотя и более полого, чем при уменьшении z от 1. Успех был велик; однако пересмотр космической истории звездообразования Мадау начался сразу после ее опубликования.

Дело в том, что в первоначальном подходе Мадау никак не учитывалась пыль; а между тем чем дальше мы смотрим по z , тем короче (лабораторные) длины волн, которые мы наблюдаем в фиксированном для нас на Земле спектральном диапазоне. Тем, следовательно, значительнее поглощение, которому должно подвергнуться излучение далеких галактик, — как известно, поглощение пропорционально $1/\lambda$. Особенно значительным выглядит влияние пыли на излучение галактик с интенсивным звездообразованием.

До полета спутника IRAS, пока наблюдаемый (без пропусков) спектральный диапазон ограничивался сверху несколькими микронами, считалось, что основной вкладчик в интегральное излучение галактик — звезды. Спутник IRAS, наблюдавший небо в далеком инфракрасном диапазоне спектра, на длинах волн 12, 25, 60 и 100 мкм, позволил «достроить» в диапазон десятков микрон спектральные распределения энергии для множества близких галактик. Абсолютно у всех типов галактик, даже у эллиптических, в спектре кроме пика, связанного с излучением доминирующего звездного населения, оказался второй пик, связанный с излучением пыли, нагретой звездами. Но если у обычных эллиптических галактик это пик вторичный в полном смысле этого слова (он ниже звездного и скорее всего порожден излучением пыли в оболочках холодных старых

звезд-гигантов), то в спектрах галактик с активными ядрами, и особенно в спектрах галактик со вспышками звездообразования этот пик выше звездного: пыль, нагретая активным ядром или молодыми звездами, на выходе из галактики светит ярче, чем «источник нагрева». Известна корреляция: чем выше интенсивность звездообразования в галактике, тем больший процент ее болометрической светимости «перекачивается» в далекий инфракрасный диапазон. В современную эпоху, на $z = 0$, во всех галактиках суммарно пыль поглощает примерно половину интегрального света звезд; если, как обнаружил Мадау, при увеличении z от 0 до 1 объемная плотность темпов звездообразования возрастает, должна увеличиваться и доля света звезд, поглощаемая пылью. Этот эффект надо было исследовать количественно, и сразу после опубликования сенсационных результатов работ Мадау и др. [17, 18] этим занялись несколько независимых групп исследователей.

Даниэла Кальцетти и Тимоти Хекман [19] обратили внимание, что в отсутствие пыли в моделях космического звездообразования на больших z неоткуда будет взяться изотропному космическому инфракрасному фону, который реально наблюдается. Они «пересчитали» эволюционный синтез Мадау, введя в модели химическую эволюцию и производство пыли. Расчеты Кальцетти и Хекмана были проведены методом итераций: сначала по наблюдательным оценкам объемной плотности ультрафиолетовой светимости вычислялась космическая история звездообразования $SFR(z)$, потом с помощью этой $SFR(z)$ оценивался темп производства металлов $Z(z)$, по металличности газа на каждом красном смещении оценивалось поглощение пылью ($E(B - V) = N(\text{HI})F(Z)$, где $N(\text{HI})$ — плотность газа на луче зрения, а $F(Z)$ — некая квадратичная формула, подогнанная по статистике DLA), наблюдаемая объемная плотность ультрафиолетовой светимости поправлялась за эту пыль, и весь процесс повторялся сначала до тех пор, пока последовательные оценки $SFR(z)$ не сошлись к одной зависимости. Попутно «интегрировался» инфракрасный фон — суммарное излучение пыли далеких неразрешенных галактик — и сравнивался с наблюдательными данными. Пробовались разные модели галактик: «замкнутая» с сохраняющейся массой, а также модели с потерей массы (с галактическим ветром) и с приобретением массы (с аккрецией), темп которых подгонялся таким образом, чтобы к $z = 0$ галактика приобрела солнечную металличность. Самой удачной в плане согласия с наблюдениями оказалась модель с галактическим ветром, где галактики в процессе ранней

эволюции теряли ~ 40 % начальной массы; однако $SFR(z)$, полученная в рамках этой модели, на больших z совсем не походила на результаты Мадау: между $z \approx 1$ и $z \approx 4$ она оказалась совершенно плоской, и ее интегрирование показало, что 30 % всех звезд во Вселенной образовались на $z > 3$.

Поглощение в галактиках на больших z оценивалось и другими, в какой-то степени более прямыми методами. Главное допущение здесь — впрочем, хорошо обоснованное наблюдениями, — это то, что Ly-break галактики на $z = 3 - 4$ в точности такие же, как галактики со вспышками звездообразования рядом с нами. Takagi, Arimoto & Vansevicius [20] промоделировали зависимость отношения светимостей L_{FIR}/L_H от цвета $B - H$, численно считая процесс переноса излучения в запыленной среде; применение рассчитанной зависимости к Ly-break галактикам дало еще большую оценку поглощения в них, чем получалось в [19]. Meurer, Heckman & Calzetti [21] по выборке близких галактик со вспышками звездообразования посчитали корреляцию отношения L_{FIR}/L_{1600} с наклоном SED вблизи 1600 Å, β , — эта величина β в общем-то есть цвет, и она хорошо прокалибрована в фотометрической системе WFPC2/HST. Поскольку все излучение, поглощенное в ультрафиолете, переизлучается в далекой инфракрасной области спектра, то L_{FIR}/L_{1600} , доля переизлученного света, и есть поглощение пылью на $\lambda = 1600$ Å, и его можно определить по цвету: $A_{1600} = 4.43 + 1.99\beta$. Применение этой формулы к Ly-break галактикам на $z \approx 3$ в Глубоком Хаббловском поле дало оценку поглощения ультрафиолетовой светимости 5 раз; в результате был сделан вывод, что $SFR(z = 3)$ из работы Мадау и др. [17] надо увеличить в 9 раз, а $SFR(z = 3)$ из работы Мадау и др. [18] — в 5.4 раза. Общее мнение по поводу космической истории звездообразования на данный момент таково: между $z \approx 5$ и $z \approx 1$ объемная плотность звездообразования была примерно постоянной, а между $z \approx 1$ и $z = 0$ упала в $5 \div 7$ раз.

Список литературы

1. *Salpeter E. E.* // *Astrophys. J.* 1955. Vol. 121. P. 161.
2. *Miller G. E., Scalo J. M.* // *Ibid. Suppl. Ser.* 1979. Vol. 41. P. 513.
3. *Schmidt M.* // *Ibid.* 1959. Vol. 129. P. 243.
4. *Kennicutt R. C.* // *Ibid.* 1998. Vol. 498. P. 541.
5. *Tinsley B. M.* // *Ibid.* 1968. Vol. 151. P. 547.

6. *Larson R. B., Tinsley B. M.* // Ibid. 1978. Vol. 219. P. 46.
7. *Arp H.* Atlas of peculiar galaxies. Pasadena: California Inst. Technology, 1966. 190 p.
8. *Charlot S., Bruzual A. G.* // Astrophys. J. 1991. Vol. 367. P. 126.
9. *Guiderdoni B., Rocca-Volmerange B.* // Astron. Astroph. 1987. Vol. 186. P. 1.
10. *Guiderdoni B., Rocca-Volmerange B.* // Ibid. Suppl. Ser. 1988. Vol. 74. P. 185.
11. *Rocca-Volmerange B., Guiderdoni B.* // Ibid. Vol. 75. P. 93.
12. *Засов А. В., Сильченко О. К.* // Астрон. журн. 1983. Т. 60. С. 1063.
13. *Сильченко О. К.* // Письма в Астрон. журн. 1984. Т. 10. С. 19.
14. *Сильченко О. К.* // Там же. 1993. Т. 19. С. 693.
15. *Kennicutt R. C., Jr., Tamblyn P., Congdon Ch. E.* // Astrophys. J. 1994. Vol. 435. P. 22.
16. *Kennicutt R. C., Jr.* // Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 1998. Vol. 36. P. 189.
17. *Madau P., Ferguson H. C., Dickinson M. E., et al.* // Monthly Notices of Royal Astron. Soc. 1996. Vol. 283. P. 1388.
18. *Madau P., Pozzetti L., Dickinson M.* // Astrophys. J. 1998. Vol. 498. P. 106.
19. *Calzetti D., Heckman T. M.* // Ibid. 1999. Vol. 519. P. 27.
20. *Takagi T., Arimoto N., Vansevicius V.* // Ibid. Vol. 523. P. 107.
21. *Meurer G. R., Heckman T. M., Calzetti D.* // Ibid. Vol. 521. P. 64.

МОЛЕКУЛЫ В ИСТЕЧЕНИЯХ ИЗ МАССИВНЫХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Лекция посвящена феноменологическому описанию явления молекулярных истечений из массивных молодых звездных объектов. Рассматривается, как они возникают, выглядят и к чему приводят. Более подробно: как проявляется присутствие молекул в областях, связанных с истечениями; причины молекулярных истечений; данные о физических характеристиках молекулярных истечений; звездообразование на границах истечений. Делается вывод о том, что наблюдения в молекулярных радиолниях показывают, что молекулярные истечения из массивных молодых звездных объектов являются интересным и разнообразным явлением, достойным всестороннего изучения. Это связано как с тем, что истечения представляют собой великолепный полигон для построения физических, химических и прочих теорий, так и с большой ролью истечений в космическом цикле рождения и смерти.

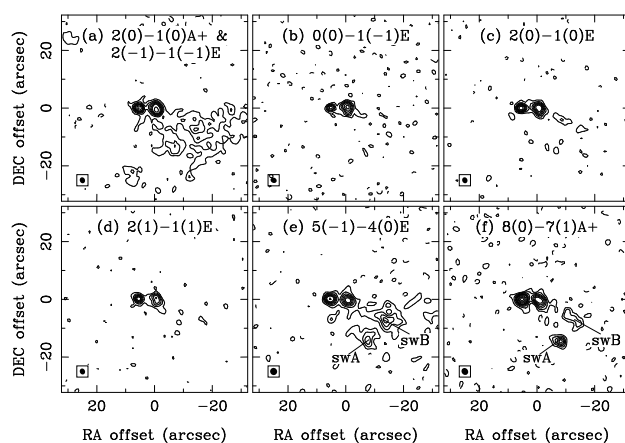


Рис. 1. Карты истечения в области звездообразования W3(OH)/W3(H₂O) в различных линиях молекулы метанола

ЦИКЛИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СОЛНЦА И ЗВЕЗД И ДИНАМО-ВОЛНЫ

«Взирая на солнце, прищурь глаза, и ты смело разглядишь на нем пятна», — справедливо отмечал Козьма Прутков. Солнечные пятна представляют собой области, в которых гигантские трубки магнитного поля выходят из-под поверхности Солнца или входят обратно. Эти трубки производятся огромным генератором электрического тока, или, как раньше говорили, динамо-машиной, так что область астрофизики, которая изучает это явление, называется теорией динамо. В солнечной динамо-машине, в отличие от движка, освещающего удаленную деревню, части не сделаны из металлических проводников, а представляют собой потоки раскаленной солнечной плазмы. Ток и магнитное поле, которые вырабатывает эта динамо-машина, тоже переменные, но период колебаний составляет не $1/50$ с, как в обычной городской сети, а 22 года. Количество солнечных пятен периодически изменяется с периодом в 11 лет, а два последовательных цикла отличаются знаком поля, который не заметен по числу пятен. Это и есть 11-летний (лучше было бы сказать 22-летний) цикл солнечной активности, о котором часто пишут в газетах. Он в значительной мере определяет помехи в радиосвязи, влияет на здоровье космонавтов и на многое другое, о чем говорят в сводках космической погоды. Еще более точно: в глубине Солнца бежит волна магнитного поля (ее называют динамо-волной), период которой равен 22 годам, а на поверхности ее сопровождает волна солнечных пятен с тем же периодом. Впервые на цикл солнечной активности обратил внимание немецкий астроном и аптекарь С. Швабе в 1843 г.

Сравнительно недавно, в конце XVII — начале XVIII в., солнечная динамо-машина дала сбой, и на Солнце долгое время почти не было пятен. Впервые это заподозрил английский астроном В. Маундер на рубеже XX в. Еще чуть раньше об этом говорил немецкий астроном Г. Шпёрер. Но Маундер опирался на очень шаткие данные — он анализировал описания солнечных пятен в журналах, газетах, книгах. Поэтому астрономы достаточно скептически встретили идею Маундера. Однако в 70-х гг. американскому ученому Дж. Эдди удалось собрать более-менее убедительный материал по изотопному составу углерода в древесных кольцах. Этот состав зависит от

солнечной активности, и для колец, относящихся к концу XVII в., он действительно оказался аномальным. Более того, Эдди обратил внимание и на другие аномалии изотопного состава углерода, относящиеся к более древним эпохам. Так в астрономию вошло понятие глобальных минимумов солнечной активности, минимумов Маундера, Г. Шпёрера и др. Астрономы поверили в реальность минимумов, но считалось, что мы мало что о них знаем и не сможем узнать ничего серьезного до тех пор, пока не случится новый глобальный минимум. Но неожиданно оказалось, что наблюдения есть!

Заговорили архивы Парижской обсерватории! Дело в том, что как раз во время минимума Маундера во Франции правил Людовик XIV, Король-Солнце, как он любил себя называть. Он действительно уделял много внимания изучению Солнца и астрономии вообще и организовал в 1643 г. первую в мире постоянную научную Парижскую обсерваторию. Она существует до сих пор, и в ее архивах были найдены бесценные подтверждения реальности минимума Маундера и детальные данные о том, как тогда выглядело Солнце. Собственно, об этих наблюдениях было известно давно, и на скудные их публикации отчасти опирался сам Маундер. Смущало то, что уж больно все здорово совпало. Король-Солнце, а какие на нем могут быть пятна? Вот услужливые астрономы не очень уж и расписывали в статьях эти пятна, тем более что одно пятно похоже на другое. Поэтому, думали многие, не солнечных пятен не было во время минимума Маундера, а публикаций об этих пятнах.

Потребовался многолетний труд замечательной женщины Элизабет Нем-Риб и ее научной группы из той же самой Парижской обсерватории, чтобы развеять эти наветы. К началу 90-х гг. XX в. они прочли рабочие записи первых астрономов—наблюдателей Парижской обсерватории и других астрономов, которые работали в XVII в. Открывшаяся картина была впечатляющей! Крупные солнечные пятна видно в хорошую погоду простым глазом, и о них знали давно. Русские летописцы, например, писали о гвоздях на Солнце. Однако систематически наблюдать солнечные пятна стало можно после того, как около 1610 г. Галилей применил линзы для астрономических исследований. С рассказа об этом событии начинается «Жизнь Галилея» Б. Брехта. Так возникло то, что мы сейчас называем телескопом (напомню, что как раз в это время гражданин Козьма Минин и князь Дмитрий Пожарский собирались освободить Москву от интервентов). На какое-то время наблюдения солнечных пятен стало модой.

Замечательно, что в это время пятна были! Назову наблюдателей, благодаря которым мы можем подтвердить этот факт: немецкий астроном-иезуит Христоф Шейнер, французский астроном П. Гассенди и польский астроном Ян Гевелиус. Солнечные пятна почти исчезают около 1645 г., но о самом этом моменте сохранилось немного прямых наблюдений, — мода начала проходить. И вот в 1660 г., за несколько лет до основания обсерватории, начинает свои наблюдения первый герой французской наблюдательной программы — иезуит Жан Пикар. Он совершил научный подвиг — вел наблюдения ежедневно, когда погода позволяла, до своей смерти в 1682 г. За 10 лет, с 1660 по 1670 г. он пронаблюдал только одно пятно, и все эти годы отрицательные результаты тщательно документированы в его рабочих журналах. Такого результата очень трудно, практически невозможно, добиться в современной обсерватории. Представьте себе, вы работаете год, другой, третий — никаких успехов (одно рядовое пятно не в счет!). Вас вызывает директор и говорит: «Знаете, всему есть предел! Нужны какие-то публикации, а не одна жалкая заметка о солнечном пятне. Займитесь чем-нибудь другим, определением массы Земли хотя бы!» (это реально предложат последователям Пикара через 50 лет).

У нас нет прямых свидетельств, но не вызывает сомнений, что именно поддержка и заинтересованность короля сыграли решающую роль для поддержания программы. Более того, Пикар вел наблюдения очень тщательно. Он не просто записывал число пятен, а единообразно фиксировал все, что видел. После смерти Пикара наблюдения продолжил до своей смерти в 1718 г. другой замечательный французский астроном-наблюдатель Филипп Ля Ир. Ля Ир тщательно сохранил научную методику, разработанную Пикаром. На счастье, Ля Ир дожил до того, как около 1715 г. Солнце вышло из минимума Маундера.

Фантастическая тщательность Пикара и Ля Ира позволяет нам судить о том, как восстановилась работа солнечной динамо-машины на исходе минимума Маундера. Отдельные солнечные пятна прослеживаются в 1670—1700 гг., их заметно больше, чем в 1660—1670-х. В 1700—1711 гг. магнитное поле Солнца совершило первое 11-летнее колебание. Но это колебание очень необычное: волна пятен бежит только в южном полушарии, а в северном пятен нет. Возможно,

нечто похожее видел и Гассенди около 1634 г., но данных об этом сохранилось немного. А вот цикл, начавшийся около 1715 г., совершенно нормальный — пятна есть по обе стороны от солнечного экватора.

Ля Ир умер чуть позже, чем Король-Солнце, скончавшийся в 1715 г. Эпоха закончилась. Парижская обсерватория существовала и процветала, но интересы французских астрономов переключились на другие вопросы. Данные о солнечных пятнах продолжали собирать. Теперь это делала прежде всего Гринвичская обсерватория в Англии. Однако прошло более 100 лет, прежде чем эти наблюдения стали такими же систематическими и детальными. Около 1805 г. Солнце снова, по-видимому, чуть не вошло в состояние глобального минимума. Случилось то, что часто называют минимумом Дальтона. Количество солнечных пятен на протяжении одного цикла снова стало аномально маленьким (однако достаточно большим по меркам минимума Маундера). Современные астрономы много бы дали за то, чтобы сказать, не было ли распределение пятен снова асимметричным, как во времена Ля Ира. Но наблюдатели в Гринвиче не записывали широт солнечных пятен (хотя и наблюдали их), и мы никогда этого не узнаем!

История французских астрономических наблюдений в XVII—XVIII вв. заставляет задуматься о многом. В середине XIX в. английский историк Бокль связал правление Людовика XIV с началом кризиса, который привел в конце концов к Великой французской революции. Бокль постоянно противопоставлял деспотическую Францию либеральной Англии. Он особенно подчеркивал, что расцвет французской науки приходился в основном на первые годы правления Короля-Солнца (с 1643 г.), а дальше деспотический режим задушил науку. Эта точка зрения воспринята многими. Действительность, как видим, сложнее. Нет сомнений, что только деспотический характер Короля-Солнца подтолкнул французских астрономов на эти многолетние исследования. Они ведь понятия не имели ни о цикле Швабе, ни о динамо-волнах, и полученная ими информация совсем не казалась тогда бесценной. А ведь король требовал не только наблюдать пятна, но и постоянно и тщательно измерять видимый диаметр Солнца, а уж это казалось очевидным идиотизмом (однако и здесь результаты были очень неожиданными; они не до конца поняты и сейчас).

Видимо, деспотическое правление действительно может помочь сконцентрировать усилия на одной теме и достичь результатов, которые при естественном развитии стали бы доступными лишь через два столетия. Но вот давление режима исчезает, интересы меняются и наблюдательная программа перестает существовать. Проходит еще много лет, и жизнь снова возвращает к тем же темам, но уже естественным путем. И это развитие не зависит от интереса королей. Не правда ли, это напоминает что-то очень знакомое из отечественной истории?

Важно и то, что Парижская обсерватория сразу же стала (и сейчас является) крупным международным научным центром. Сюда приезжали иностранные астрономы, которые много сделали для завоевания международного престижа французской науки. Замечу, что программу архивных изысканий, наряду с другими источниками, финансировало Министерство обороны Франции, полагая, вероятно, что так и нужно воспитывать национальную идею.

Есть еще одна сторона вопроса, мимо которой трудно пройти. Галилей был осужден церковью в 1632 г. в связи со своими астрономическими работами, но уже в 1620-х гг. самые интересные наблюдения Солнца ведет иезуит Шейнер. Среди астрономов-наблюдателей XVII в. полно иезуитов и других людей церкви, и у нас нет оснований сомневаться ни в их вере, ни в интересе к астрономии. Оказывается, даже хрестоматийную ситуацию с осуждением Галилея трудно раскрасить только в черные и белые тона. И конечно, хочется еще раз вспомнить замечательного французского астронома Элизабет Нем-Риб. Ее энтузиазм и патриотизм помогли добыть из забвения архивов эти бесценные материалы. В 1996 г. Элизабет безвременно умерла. Мы знаем, что еще не все архивные данные о солнечных пятнах опубликованы и систематизированы. В особенности это касается итальянских архивов: итальянцы быстрее всего откликнулись на изобретение своего соотечественника. Но теперь придется ждать, пока еще кто-нибудь совершит такой же подвиг, как французские астрономы наших дней, открывшие миру наблюдения своих далеких предков.

Здравый смысл подсказывает, что раз Солнце — одна из многих звезд, то такие же циклы активности должны существовать и на звездах, похожих на Солнце. Поэтому, наблюдая отличия этих циклов активности от солнечных, мы лучше поймем и цикл солнечной активности, и его роль в земных процессах. Эта мысль кажется очень привлекательной; одно плохо: звезды в телескоп не разреша-

ются. Они видны как точки, точнее, их видимые размеры связаны с дефектами наблюдений. Поэтому в телескоп невозможно увидеть звездные пятна, похожие на солнечные пятна, а уж тем более проследить за их периодическими изменениями. Ситуация кажется безнадёжной, тем не менее астрономия успешно справилась с ней, и сейчас мы многое знаем о циклической активности многих звезд, напоминающих Солнце.

Давно было замечено, что светимость далеко не всех звезд постоянна, у многих звезд она меняется, в том числе и периодически. Причин этому может быть много. Звезда может входить в состав двойной системы, и звезда-компаньон по этой системе периодически закрывает интересующую нас звезду, от чего, естественно, меняется и видимый нами поток излучения. Такие звезды называются затменно-переменными. Поток света от звезды может меняться, например, из-за периодических пульсаций ее радиуса. Очевидно, что Солнце не принадлежит к таким звездам (иначе, например, жизнь на Земле вряд ли бы сохранилась). Поэтому раньше астрономы не рассматривали Солнце как переменную звезду.

Заметили ли бы мы солнечный цикл, если бы наблюдали Солнце с планеты, обращающейся вокруг какой-либо близкой звезды? Непосредственно по светимости Солнца — вряд ли, колебания солнечной постоянной, о которых говорят исследования солнечного цикла, микроскопические. Однако если наблюдать подходящие спектральные линии, которые связаны с излучением атомов различных химических элементов, то заметить цикл можно. Дело в том, что магнитные поля, которые выносятся на поверхность звезды при образовании пятен, в дальнейшем попадают во все более и более удаленные слои солнечной атмосферы, вплоть до солнечной короны. Здесь магнитная энергия так или иначе превращается в тепловую и нагревает находящееся там вещество. Эти слои гораздо менее плотные, чем солнечные недра, и происходящий нагрев может быть значительным. А температура среды как раз и связана с тем, как излучают атомы разных элементов, и колебания этого излучения могут быть достаточными, чтобы их заметить с расстояний в несколько десятков световых лет. А это значит, что, наблюдая подходящие спектральные линии (прежде всего линии кальция), мы можем узнать, есть ли циклы активности на других звездах, подобных Солнцу. Это стало ясно лет тридцать назад, и тогда же астрономы начали систематические поиски звездных циклов.

Решающий шаг в этих наблюдениях сделал американский астроном О. Вильсон. Он отобрал группу звезд, похожих на Солнце, и добился начала систематических наблюдений линий кальция для этих звезд. В результате возникла программа наблюдений, известная в астрономическом мире как кальциевый проект. Наблюдения ведутся в обсерватории Маунт Вильсон, т. е. гора Вильсона. Это случайное, но символичное совпадение. Наблюдения продолжаются уже тридцать лет, за это время — человеческая жизнь коротка — сменилось не одно поколение наблюдателей. В списке авторов работы, подводящих итог наблюдений за десятки лет, рядом с фамилиями активно работающих астрономов стоят фамилии тех, кого уже нет с нами, в том числе и Вильсона. Сейчас лидером этой научной группы является Салли Балюнас, а одним из основных наблюдателей — Вилли Сун, работающие в Гарвардском университете.

Наблюдения кальциевого проекта сложны прежде всего потому, что они требуют многолетних, целенаправленных и систематических усилий. Очень важно хорошо подобрать изучаемые звезды (а их в кальциевом проекте более ста, и жизнь показала, что отбор произведен очень хорошо). А главное — нужно годами убеждать руководство обсерваторий, научную общественность, фонды, которые финансируют исследования, что проект нужно продолжать. Подобные наблюдения проводились в различных странах, в СССР они были начаты в Крымской обсерватории. Там они продолжают и сейчас, но теперь это — Украина. Все наблюдения по-своему ценны, но данным кальциевого проекта нет равных в полноте и систематичности. Опираясь на данные, мы можем сейчас обоснованно утверждать, что циклы активности, подобные солнечному, встречаются на многих звездах, сходных с Солнцем по своим физическим характеристикам. Они позволяют проследить роль вращения звезды: чем быстрее вращается звезда, тем сильнее магнитное поле, осцилляции которого и представляют собой цикл звездной активности. Наблюдаемая зависимость величины магнитного поля от угловой скорости вращения звезды по крайней мере качественно согласуется с предсказаниями теории, а это самое большее, на что можно рассчитывать, опираясь на опыт этих первых наблюдений.

Данные кальциевого проекта и других проектов по изучению звездной активности, несомненно, привели к очень важным выводам. Но все же чувство неудовлетворенности остается: очень уж окольным оказался путь, по которому астрономы пришли к открытию звездных циклов. Нельзя ли все-таки как-то увидеть пятна на

звездах? Оказывается, можно! Легче всего представить себе схему подобных наблюдений на примере затменно-переменной звезды из двойной системы. Пусть на этой звезде есть пятно, температура которого отличается от температуры окружающей поверхности. Другая температура — другие интенсивности спектральных линий! А теперь вспомним, что звезда-компаньон закрывает от нас различные участки звезды. Хотя наш телескоп не позволяет наблюдать разные участки звездной поверхности по нашему желанию, из-за затмений мы видим в разные моменты времени излучение различных участков поверхности. Эту картину можно описать сложной системой интегральных уравнений, которые показывают, как формируется видимое излучение звезды в зависимости от положения звезды-компаньона. Эти уравнения можно попытаться решить, но задача кажется заведомо непосильной: мы хотели бы восстановить по одномерному графику (интенсивность излучения от времени) двумерную картину — карту температур на поверхности звезды (далее уже можно разбираться в том, как температура связана с магнитным полем, химическим составом и т. п.). Но все не так безнадежно; наблюдая много спектральных линий, можно набрать недостающую информацию. Однако уравнения получались столь сложные, что руки опускались.

Оказалось, и с интегральными уравнениями можно справиться! В 60-е гг. академик А. Н. Тихонов создал теорию решения интегральных уравнений на компьютерах (а по-другому их практически никогда и нельзя решать). Такое решение всегда приближенное и главная проблема — как сделать так, чтобы компьютер искусственно не измельчал пятна, не рисовал вместо одного пятна двадцать. Тихонов придумал удачную систему штрафов за такое измельчение и доказал теоремы, обосновывающие метод, который со временем получил название тихоновской регуляризации. Компьютеры 60-х были еще совсем не похожи на современные. То, что сейчас любой студент и многие школьники без труда рисуют на экране, тогда давалось месяцами упорного труда, ведь не было еще и самих экранов, не было не только Windows, но и командной строки, а вместо нее набивали перфокарты. Но Тихонов со своими учениками упорно работал над приложениями разработанных методов в разных областях науки. Эти исследования велись по многим направлениям, самой удачной на рубеже 80-х гг. оказалась работа по построению карт звездных поверхностей, которой занимались молодые тогда сотрудники (а теперь известные профессора МГУ) А. В. Гончарский и А. Г. Ягола.

Им удалось добиться того, чтобы компьютерные программы работали надежно, быстро, а решаемые уравнения соответствовали знаниям об исследуемых звездах. Конечно, это было возможно потому, что они работали с хорошими астрономами, один из них — А. М. Черепашук, сейчас он член-корреспондент РАН, директор Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга, одного из важнейших астрономических учреждений нашей страны.

Работы Гончарского, Яголы и их коллег произвели огромное впечатление на специалистов. Интересно прочитать опубликованную стенограмму выступления В. Л. Хохловой, еще одного астронома, участвовавшего в этой работе, на одной из международных конференций. Конечно, слушатели сначала плохо понимали, о чем идет речь и стали задавать вопросы. Наконец, Вере Львовне удалось прояснить суть дела. Дальше в стенограмме написано: «в аудитории на несколько минут установилось тяжелое молчание». Никто не предполагал, что такие задачи поддаются решению.

Конечно, были и другие научные группы, которые по-своему шли к построению карт поверхностей звезд. Даже сам не очень удачный термин, обратные доплеровские изображения, которым называется сейчас этот метод, был предложен американскими астрономами. Сейчас этот метод прочно вошел в аппарат звездной астрономии, его применяют во многих обсерваториях мира. Сами авторы метода тоже интенсивно работают, развивают заложенные в нем идеи. Но их сейчас привлекает не астрономия, а другие области — они же не астрономы, а математики. Оказалось, например, что умея строить карты звездных поверхностей, легко научиться создавать системы защиты документов, а в том, что это важно, убеждать особо не приходится.

Возможности метода обратных доплеровских изображений, конечно, не безграничны. Он позволяет различать только крупные пятна, гораздо крупнее тех, которые мы видим на Солнце. Благодаря этому методу мы знаем, что есть звезды, напоминающие Солнце, на которых пятна занимают гораздо большую площадь, чем на Солнце, причем эти пятна привязаны к определенным местам звездной поверхности. По-видимому, иногда это связано с влиянием звезды-компаньона. Такие звезды, в частности, наблюдает Н. Пискунов, один из тех, кто совсем молодым студентом начинал строить изображения звездных поверхностей в Москве, а сейчас делает это в Швеции.

Техника обратных доплеровских изображений существует уже два десятилетия, но астрономам еще предстоит добиться того, чтобы на ее основе был начат и проведен проект, сопоставимый по масштабам с кальциевым проектом. Дело в том, что построение карты звездной поверхности — очень трудоемкий процесс, он требует гораздо больше времени для наблюдений и их обработки, чем изучение одной спектральной линии кальция. Специалистам предстоит убедить общественность, что понимание звездной, а значит и солнечной активности, стоит этих затрат. Например, хотя на Солнце пятна возникают почти с равной вероятностью на всех долготах, многие астрономы думают, что на некоторых долготах (их называют активными) пятна появляются чаще, чем на других. Возможно, что существование активных долгот говорит о чем-то существенном для понимания цикла солнечной активности, но изучать такое не очень хорошо выраженное явление непросто. Другое дело изучение активных долгот на тех звездах, где они выражены хорошо и никаких сомнений в их существовании не возникает!

Магнитное поле Солнца и звезд создается механизмом динамо. Схема работы динамо была предложена на примере солнечного динамо около полувека назад американским астрономом Юджином Паркером. Согласно этой схеме тороидальное магнитное поле получается из полоидального под действием дифференциального вращения. Обратный процесс превращения тороидального магнитного поля в полоидальное осуществляется в результате нарушения зеркальной симметрии конвекции во вращающемся теле. Оказывается, что сила Кориолиса при действии на поднимающиеся и расширяющиеся или опускающиеся и сжимающиеся вихри приводит к преобладанию правых вихрей в северном полушарии и левых вихрей — в южном полушарии. В результате электродвижущая сила, возникающая в результате действия электромагнитной индукции Фарадея, после усреднения по пульсациям скорости приобретает компоненту, параллельную магнитному полю. Напомним, что обычно электродвижущая сила и вызываемый ею ток перпендикулярны магнитному полю. Параллельная магнитному полю компонента тока и замыкает цепь самовозбуждения в динамо Паркера.

Расчет динамо-волны производится примерно так же, как в курсах квантовой механики с помощью метода ВКБ решают уравнение Шредингера. В лекции рассказывается о технике подобных вычислений.

ПРИРОДА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН: СОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛЬ

Анализируется общая магнитная структура типичного солнечного пятна с учетом данных современной гелиосейсмологии [1]. Отмечаются основные особенности структуры пятна, в частности:

1) наличие тонкого переходного слоя между магнитной силовой трубкой пятна и окружающей фотосферой (конвективной зоной) [2]—[5];

2) относительно малая глубина нижней магнитной границы солнечного пятна, т. е. того уровня под пятном, начиная с которого магнитная силовая трубка пятна резко расширяется книзу.

Первая из этих особенностей лежит в основе теории диссипации солнечных пятен, развитой ранее автором [6]—[8], а на основе второй построена модель «мелкого» солнечного пятна и развит энергетический метод ее описания [9]—[12].

Рассчитана глобальная (без учета тонкой структуры) равновесная конфигурация плазмы и магнитного поля в солнечном пятне, учитывающая веерообразное распределение магнитного поля над пятном, вильсоновскую депрессию $\zeta(B)$ и величину нижней магнитной границы L [11], [12].

Пятно погружено в реальную среду (фотосферу и конвективную зону), которая описывается известными численными моделями [13], [14]. В модели учтена также эмпирическая зависимость эффективной температуры пятна от напряженности магнитного поля [15].

Исследована устойчивость полученных равновесных состояний пятна. Показано, что солнечное пятно, как целостная магнитоплазменная структура, устойчиво в относительно узком диапазоне напряженностей магнитного поля — примерно между 0.8—1 и 4—5 кГс.

В этом диапазоне устойчивости солнечное пятно может колебаться как целое с собственной частотой $\omega(B)$, которая в интервале между 0.8 и 2.6 кГс растет с ростом напряженности магнитного поля в пятне и падает до нуля с увеличением поля от 2.6 до 4—5 кГс. Зависимость $\omega(B)$ рассчитана для основной глобальной моды, когда в колебания вовлечена только тень пятна. Показано, что в том случае

когда в колебательный процесс вовлекается и полутень пятна, эффективная масса колеблющегося вещества возрастает в несколько раз, и становится возможным появление нижних субгармоник [12]: $\omega_2 \cong \omega_1/2$, $\omega_3 \cong \omega_1/3$.

Теоретические кривые $\omega_1(B)$, $\omega_2(B)$ и $\omega_3(B)$ хорошо соответствуют наблюдательным данным, полученным в Пулковке несколькими различными независимыми методами:

— по временным изменениям магнитного поля пятен (зеemanовское расщепление линий в спектре пятна; Наговицын, Вяльшин ГАО РАН [16]–[18]);

— по лучевым скоростям (доплер-эффект; Парфиненко, Ефремов, ГАО РАН [19]);

— по колебаниям интенсивности поляризованного микроволнового излучения над пятнами (данные радиогелиографа Нобеяма; Гельфрейх, Наговицын, ГАО РАН [20]–[21]).

Периоды найденных долгопериодических собственных осцилляций солнечных пятен лежат в пределах от 40 до 200 мин.

Колебания этого низкочастотного диапазона принципиально отличаются от обычно исследуемых и хорошо известных в литературе короткопериодических, 3–5-минутных осцилляций, наблюдаемых внутри тени пятна, которые представляют собою захваченные в верхних слоях магнитной силовой трубки пятна медленные магнитозвуковые волны [22]–[28].

Список литературы

1. Zhao J., Kosovichev A. G, Duval T. L. *Astrophys. J.* 2001. Vol. 557. P. 384.
2. Соловьев А. А., Калинин А. А. Солнечные данные. 1983. № 3. С. 65.
3. Соловьев А. А. // *Астрон. журн.* 1997. Т. 74. № 1. С. 131.
4. Соловьев А. А. // Там же. 1998. Т. 75. № 1. С. 125.
5. Соловьев А. А. // Там же. 1984. Т. 61. № 3. С. 102.
6. Соловьев А. А. // Там же. 1976. Т. 53. № 1. С. 140.
7. Соловьев А. А. // Там же. 1991. Т. 68. № 1. С. 166.
8. Соловьев А. А. // Там же. 1991. Т. 68. № 3. С. 624.
9. Соловьев А. А. // Там же. 1984. Т. 61. Вып. 4. С. 764.

10. Соловьев А. А. // Тр. IX Пулковской конф. по физике Солнца/ ГАО РАН. Пулково, 2005. С. 577.
11. Soloviev A. A., Kirichek E. A. The stability and eigen oscillations of sunspots // Solar Activity and its Magnetic Origin: Proc. of IAUS 233 Symp. Cairo, Egypt, Marth 31—Apr. 3. 2006.
12. Соловьев А. А., Киричек Е. А. // Тр. X Пулковской конф. по физике Солнца/ ГАО РАН. Пулково, 2006. С. 49.
13. Gingerich O. et al. // Solar Phys. 1972. Vol. 18. P. 347.
14. Spruit H. C. // Ibid. 1974. Vol. 34. P. 277.
15. Kopp G., Rabin D. // Ibid. 1992. Vol. 141. P. 253.
16. Borzov V. V., Vialshin G. F., Nagovitsyn Yu. A. // Contrib. Astr. Obs. Skalnat Pleso. 1986. Vol. 15. P. 75.
17. Соловьев А. А., Наговицын Ю. А. // Тр. конф. Солнечная активность как фактор космической погоды: СПб., 2005. С. 593.
18. Nagovitsyn Yu. A., Vyalshin G. F. // Астрон. циркуляр. 1992. № 1533. С. 1.
19. Ефремов В. И., Парфиненко Л. Д., Соловьев А. А. // Астрон. журн. 1991. Т. 83. № 6.
20. Gelfreikh G. B., Shibasaki K., Nagovitsyna E. Yu., et al. // Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity: Proc. of IAU Symp. No 223. St. Petersburg, 2004. P. 525.
21. Gelfreikh G. B., Nagovitsyn Yu. A., Nagovitsyna E. Yu. // Publ. Astr. Soc. Japan. 2006. Vol. 58, № 1. P. 29.
22. Thomas J. H., Cram L. E., Ney A. H. // Nature. 1982. № 297. P. 485.
23. Обриджо В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 1985.
24. Мозилевский Э. И., Обриджо В. Н., Шельтинг Б. Д. // Астрон. циркуляр. 1972. № 669. С. 1.
25. Bogdan T. J. // Solar Phys. 2000. Vol. 192. P. 373.
26. Zugzda Y. D., Staude J., Locans V. A. // Ibid. 1984. Vol. 91. P. 219.
27. Zhukov V. I. // A&A. 2002. Vol. 386. P. 653.
28. Zhukov V. I. // Ibid. 2005. Vol. 433. P. 1127.

К. В. Холшевников¹, Э. Д. Кузнецов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Уральский государственный университет

ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Введение

Развитие наблюдательной и вычислительной техники привело к заметному прогрессу в изучении движения основных тел Солнечной системы (Солнца и больших планет) в двух взаимосвязанных направлениях. Первое — представление движения с наибольшей возможной точностью на коротком интервале времени (порядка 10 – 10^3 лет). Второе — качественное описание основных свойств движения на космогонических временах (порядка 10^4 – 10^{10} лет). В настоящем обзоре, не претендуя на полноту, мы опишем важнейшие достижения в указанной области науки. Основное внимание мы уделим результатам последних десятилетий, но коснемся и последнего столетия, и даже древних времен.

От халдеев и греков до Кеплера включительно теоретическая астрономия не имела возможности опираться на физику (ввиду неразвитости последней) и базировалась исключительно на математике. С точки зрения современного математика — специалиста по теории аппроксимации, астрономы тогда строили математические модели, в каком-либо смысле наилучшим образом представляющие наблюдения. Самое интересное, что модели эти очень похожи (с точки зрения упомянутого математика), хотя почти вся литература по истории астрономии говорит об обратном. Во-первых, каждая модель представляла движение планет на бесконечном в обе стороны интервале времени. Во-вторых, движение описывалось квазипериодической по П. Г. Болю [24] функцией времени, т. е. почти-периодической по Г. Бору функцией с конечным набором базовых частот. У Птолемея, Коперника и Тихо Браге это были частоты обращения по деферентам и эпициклам. С наращиванием их числа увеличивался и частотный базис. У Кеплера он уменьшился до числа планет N , каждая

© К. В. Холшевников, Э. Д. Кузнецов, 2007

из которых обращалась вокруг Солнца со своей собственной частотой. Вопрос об устойчивости планетных орбит не стоял: в почти-периодическом движении все возвращается на круги своя.

Небезынтересно отметить такой парадокс. Математическая теория Кеплера, послужившая фундаментом физики Ньютона, описывает движение планет с ограниченной точностью, причем с течением времени расхождения теории и наблюдений растут до неприемлемых значений (скажем, до 180° для разности долгот). Главная причина — недостаточность базиса из N частот. Между тем совершенно нефизическая теория Птолемея–Коперника на сколь угодно большом промежутке времени отклоняется от наблюдений на сколь угодно малую величину при достаточном числе эпициклов и оптимальном определении параметров. Отмеченная в эпоху Возрождения *громоздкость* эпициклической системы вызвана отсутствием тогда теории обработки измерений: при правильном подборе параметров и сохранении достигнутой тогда точности в одну угловую минуту число эпициклов можно сократить в несколько раз [38]. Но стал бы тогда Кеплер искать свой (кеплеровский!) эллипс?

Начиная с Ньютона задача о движении планет приобрела твердую физическую основу: теорию гравитации. Математической моделью стала система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) порядка $6N$, где N — число планет. Последующие три столетия не изменили основного характера модели. Полный учет приливных взаимодействий и эффектов ОТО осуществляется с помощью уравнений более сложных, чем обыкновенные дифференциальные. Но в силу малости этих эффектов описания в терминах ОДУ достаточно. Например, в ОТО с точностью до $(v/c)^4 \approx 10^{-15}$ включительно движение может быть описано гамильтоновой системой ОДУ. Здесь v — скорость Меркурия, c — скорость света.

С XVIII и до середины XX в. все нужные для практики теории движения планет строились методом малого параметра с существенными вариациями. Эйлер, Лагранж, Пуассон, Леверрье, Делоне предпочитали брать за фазовые переменные оскулирующие элементы, тогда как Клеро, Андуайе, Энке, Ганзен, Хилл, Ньюком — координаты и скорости (последние, впрочем, не входят в правые части уравнений при учете лишь ньютоновского притяжения). Лаплас внес значительный вклад в оба равноправных подхода к описанию фазового пространства [32]. Мы остановимся лишь на первом. Оскулирующие элементы орбит планет делятся на две группы: вектор медленных $x = (x_1, x_2, \dots, x_{N_1})$ и быстрых $y = (y_1, y_2, \dots, y_{N_2})$ пере-

менных, удовлетворяющих уравнениям движения

$$\dot{x} = \mu f(x, y), \quad \dot{y} = \omega(x) + \mu g(x, y). \quad (1)$$

Здесь μ — малый параметр, отношение массы Юпитера к массе Солнца; ω, f, g — гладкие функции. Переменные x называются медленными, поскольку в невозмущенном движении (при $\mu = 0$) скорость их изменения тождественно равна нулю. Таковы a, e, i, Ω, π — большая полуось, эксцентриситет, наклон, долгота узла и долгота перицентра, а также любые функции от этих величин. За быстрые переменные y обычно берут равномерно (при $\mu = 0$) растущие углы типа средней аномалии или средней долготы, и тогда средние движения ω , в механике называемыми частотами, зависят только от больших полуосей. В методе малого параметра решение (1) представляется рядами

$$x = x_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu^n x_n(t), \quad y = y_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu^n y_n(t). \quad (2)$$

Здесь x_0 постоянна, а y_0 — линейная функция времени (решение (1) при $\mu = 0$). Алгоритм нахождения первого приближения (x_1, y_1) построен еще Ньютоном. В деталях алгоритмы определения произвольного приближения (x_n, y_n) разработаны А. М. Ляпуновым и А. Пуанкаре [25]. Ими также описаны важнейшие свойства решения (2). В частности, доказана равномерная сходимость рядов (2) при $-T \leq t \leq T$, $|\mu| < \mu_0$ для произвольного T и достаточно малого μ_0 . Поэтому метод малого параметра часто именуют методом Ляпунова—Пуанкаре. Конструктивная оценка T как функции от μ_0 получена в [36]. Для систем общего вида можно положить

$$T = \frac{C_1}{\sqrt{\mu_0}}, \quad (3)$$

где через C с различными индексами мы будем обозначать постоянные величины. Для решений, удовлетворяющих условиям теоремы Лагранжа—Лапласа о неизменности больших полуосей (см. следующий раздел), оценка улучшается:

$$T = \frac{C_2}{\mu_0}. \quad (4)$$

Лучшая по сравнению с (4) оценка может существовать лишь в исключительных случаях.

Таким образом, методом Ляпунова—Пуанкаре можно сколь угодно точно (точность ограничивают лишь погрешности измерений) представить движение планет на временах в десятки тысяч лет, но времена в миллионы лет принципиально недоступны этому методу.

В XIX в. появляются работы, аналитически описывающие в первом и втором приближении эволюцию на космогонических временах. Крупнейший вклад внесли Лагранж, Лаплас, Гаусс, Пуассон, затем Линдштедт и Пуанкаре [32]. В XX в. на этой основе развивается метод осреднения. В последней трети века появляются мощные аналитические и численные методы, позволившие существенно продвинуться в описываемой области небесной механики. Подробнее об этом — в следующих разделах.

Теория Лагранжа—Лапласа

Для качественного описания орбитальной эволюции на космогонических временах Лагранж, Лаплас и позднее Гаусс предложили метод исключения короткопериодических членов, т. е. замены точных уравнений движения (1) на приближенные:

$$\dot{x} = \mu F(x), \quad \dot{y} = \omega(x) + \mu G(x), \quad (5)$$

где F , G — средние значения f , g по компонентам вектора углов y . Если разложить f , g в ряды Фурье, то за F , G следует принять свободные члены рядов, отбрасывая все короткопериодические члены. Ожидается, что решение системы (5) не сильно отличается от решения (1), поскольку отброшены мелкие дрожания и оставлены плавно меняющиеся воздействия планет друг на друга. В большинстве случаев (но не всегда!) это действительно так, но доказательства были получены значительно позднее, о чем впереди.

Поведение y на космогонических временах не представляет интереса (кому важно, был ли Юпитер 1 сентября миллионного года до н. э. в Раке или Козероге?). Нас интересует лишь эволюция орбит (переменные x), но не фаз, положений на орбитах (переменные y). Поэтому второе из уравнений (5) можно отбросить, поскольку первое не зависит от y . Компоненты вектора $F(x)$, отвечающие изменениям больших полуосей, равны нулю — знаменитая теорема Лагранжа—Лапласа «о неизменности больших полуосей». Заметим, что неизменны средние большие полуоси, удовлетворяющие уравнению (5). Что касается оскулирующих элементов, то из теоремы Лагранжа—Лапласа следует лишь ограниченность отвечающих большим полу-

осям компонент вектора x_1 и, следовательно, малость μx_1 в соотношениях (2). Уже для x_2 это не так.

Изменение оставшихся элементов e, i, Ω, π удобно исследовать, переходя для каждой планеты к переменным типа

$$\xi = (e \cos \pi, e \sin \pi, \sin(i/2) \cos \Omega, \sin(i/2) \sin \Omega). \quad (6)$$

Как было показано еще Даламбером, Лагранжем и Лапласом (см. [30] и более современную трактовку [40]), уравнения (5) переходят в систему порядка $4N$:

$$\dot{\xi} = \Phi(\xi), \quad (7)$$

где Φ голоморфна в окрестности начала, причем $\Phi(0) = 0$. Поскольку наклоны и эксцентриситеты больших планет малы, в первом приближении можно оставить лишь линейные члены и заменить (7) линейной системой

$$\dot{\xi} = A\xi \quad (8)$$

с постоянной $4N \times 4N$ – матрицей A , коэффициенты которой зависят от больших полуосей. Консервативность уравнений движения позволяет свести дело к $2N \times 2N$ – матрице, а даламберовские свойства уравнений [39] — к $N \times N$ – матрице. В начале XIX в. считалось $N = 6$. Теперь надо положить $N = 8$. Плутон не укладывается в теорию из-за острой резонансности пары Нептун–Плутон и близости их орбит к пересечению.

Для конкретных значений больших полуосей матрица A становится числовой и общее решение (8) находится просто, что и было сделано Лагранжем и Лапласом. Решение представило линейной комбинацией периодических функций, т. е. явилось квазипериодической функцией Боля [24]. Как показали К. Вейерштрасс и независимо О. И. Сомов [32], так будет при всех значениях больших полуосей, включая случай кратных собственных чисел матрицы A , что вытекает из теоремы А. М. Ляпунова об устойчивости положения равновесия, поскольку за функцию Ляпунова можно взять положительно определенную третью компоненту вектора площадей. Лагранж и Лаплас фактически доказали теорему Ляпунова для частного случая системы (8) и указанной конкретной функции. Заметим, что теорема применима и к полной системе (7), а не только к ее линейному приближению (8). Сохранение первых двух компонент вектора площадей влечет [30] обращение в нуль одной из фундаментальных частот для уравнения (8).

Итак, в XIX в. было установлено, что *при условии близости решений систем* (1) и (5) большие полуоси планетных орбит испытывают только короткопериодические колебания малой амплитуды (порядка μ); наклоны и эксцентриситеты испытывают, кроме того, долгопериодические колебания, амплитуды которых больше и в Солнечной системе имеют порядок $\sqrt{\mu} \div \sqrt[3]{\mu}$.

Развитие метода осреднения

В первой половине XX в. трудами Х. Цайпеля, Н. М. Крылова, Н. Н. Боголюбова [4, 36] метод осреднения, введенный Гауссом как приближенный, стал точным, по крайней мере формально (с рядами обращались как с многочленами). Достаточно совершить близкую к тождественной замену переменных:

$$x = X + \mu u(X, Y, \mu), \quad y = Y + \mu v(X, Y, \mu) \quad (9)$$

и получить уравнения типа (5) для X, Y :

$$\dot{X} = \mu F(X, \mu), \quad \dot{Y} = \omega(X) + \mu G(X, \mu). \quad (10)$$

От u, v требуется периодическая зависимость от Y , и тогда новые переменные всегда будут близкими к старым. Но в этом случае привести систему к виду (10) с независимыми от Y правыми частями удастся только в нерезонансном случае. Для больших планет Солнечной системы (Плутон мы исключили) это возможно, так как характерные малые знаменатели оказываются величинами порядка $\sqrt{\mu}$, но не μ . Иными словами, большие планеты Солнечной системы движутся вне острого резонанса.

В случае же резонанса, т. е. в μ -окрестности тех точек X , для которых

$$\nu\omega(X) \stackrel{def}{=} \nu_1\omega_1 + \dots + \nu_{N_2}\omega_{N_2} = 0 \quad (11)$$

с целыми взаимно-простыми в совокупности числами $(\nu_1, \dots, \nu_{N_2})$, функции F, G зависят еще от резонансного аргумента $Z = \nu_1 Y_1 + \dots + \nu_{N_2} Y_{N_2}$. Переменную Z можно назвать *медленной в окрестности резонанса*, поскольку при $\mu = 0$ скорость изменения Z обращается в нуль при условии (11). Система (10) заменяется более сложной:

$$\dot{X} = \mu F(X, Z, \mu), \quad \dot{Z} = \nu\omega(X) + \mu G(X, Z, \mu). \quad (12)$$

В самом конце XX в. обращается внимание на перекрытие резонансов, т. е. на окрестность тех точек X , где соотношение (11) выполняется для двух и более линейно-независимых векторов ν . В этом случае переменная Z становится векторной.

Отметим два существенных достижения в развитии метода осреднения, принадлежащих Н. М. Крылову и Н. Н. Боголюбову. Во-первых, метод был распространен с консервативных на произвольные системы вида (1). Для небесной механики это стало важным с запуском ИСЗ для учета атмосферного торможения. Во-вторых, было показано, что ряды по степеням μ для функций u , v , F , G представляют собой асимптотические разложения. Это было первое обоснование до того формальных алгоритмов метода осреднения. Напомним, что ряды для указанных функций не являются сходящимися ни в какой сколь угодно малой области переменных X , помноженной на область всех вещественных Y . В некоторых руководствах в формулировке этой теоремы Пуанкаре вместо отсутствия сходимости в области говорится о расходимости, что неверно (см. ниже о КАМ-теории). В середине XX в. конструктивные оценки разностей $\|x - X\|$, $\|y - Y\|$ как функций времени на интервале $|t - t_0| \leq T_0 \mu^{-\sigma}$ были получены в работах Ю. А. Митропольского, А. М. Самойленко, В. М. Волосова, Б. И. Моргунова, Е. А. Гребеникова, Ю. А. Рябова и др. [14]. Большинство работ касаются случая $\sigma = 1$, что не сильно продвигает нас за границы применимости метода малого параметра.

В 60-е гг. произошло два прорыва в рассматриваемой нами области.

Вместо удручающе неинвариантного (терминология В. И. Арнольда) метода Гамильтона—Якоби—Цайпеля фактического определения u , v , F , G Г. Хори и независимо от него А. Депри предложили метод преобразований С. Ли [36]. Этот метод, заслуженно называемый также методом Хори—Депри, обладает рядом практических преимуществ (например, прямое и обратное преобразование $x, y \longleftrightarrow X, Y$ дается одними и теми же формулами) и, главное, теоретическими преимуществами: все величины выражаются через скобки Пуассона и потому инвариантны относительно канонических преобразований. Это, например, позволяет легко доказать сохранение формы трех интегралов площадей для уравнений (10) и, как следствие, обращение в нуль одной из фундаментальных частот для уравнения (8) в произвольном порядке по μ [37].

Появление теории А. Н. Колмогорова, В. И. Арнольда и Ю. Мозера (КАМ-теории [3, 14]) дало обоснование метода осреднения в терминах сходимости в дополнение к обоснованию Крылова—Боголюбова в терминах асимптотических разложений. Оказалось, что мир многочастотных систем устроен довольно сложно. Даже при очень малых μ точки сходимости, хотя мера их близка к полной, не заполняют областей, перемежаясь с точками расходимости, где поведение траекторий сложно и запутанно. Однако сложность эта по теореме Н. Н. Нехорошева [26, 27] проявляется лишь на экспоненциально больших временах порядка $\exp(-a/\mu^b)$ при некоторых положительных a, b . Теоремы КАМ-теории доказаны для систем весьма общего вида и потому требуют нереальной малости μ . Для конкретных систем (например, для плоской круговой ограниченной задачи трех тел) можно получить вполне приемлемую верхнюю границу μ , отвечающую планетарным массам [31].

Современные численные теории

Изобретение ЭВМ и последовавшее за этим активное применение вычислительной техники при решении прикладных и фундаментальных научных задач привели к появлению численных теорий движения небесных тел.

Важным стимулом разработки численных теорий стали высокие требования к точности эфемеридного обеспечения, необходимого для управления полетом космических аппаратов. Аналитические теории Леверье, Хилла, Ньюкома, Клеменса, служившие основой вычисления эфемерид больших планет для всех национальных ежегодников до 1984 г., не обладали точностью, требуемой для решения задач космонавтики. Появление новых наблюдательных методов (траекторные измерения, локация и т. д.) обеспечило численные модели измерительными данными соответствующей точности.

Построение численной теории движения больших планет требует совместного численного интегрирования уравнений орбитального движения планет и Луны, а также уравнений вращения Земли и Луны. Такой подход вызван необходимостью учета значительных лунных возмущений в движении барицентра системы Земля—Луна. Орбита же Луны испытывает влияние несферичности гравитационных полей Земли и Луны. Резонансный характер связи между орбитальным и вращательным движением Луны требует согласования теорий в единой динамической модели.

Высокоточные численные теории движения планет

С конца 1960-х гг. в СССР и США несколькими группами велись работы по созданию высокоточных численных теорий движения больших планет для эфемеридного и навигационного обеспечения космических программ.

В Советском Союзе численные эфемериды планет были созданы в результате исследований, проводившихся в Институте прикладной математики [1], Институте радиотехники и электроники совместно с Центром управления полетами ЦНИИМАШ [17], Институте теоретической астрономии [13, 16, 20, 21]. На основе этих исследований в СССР еще в 1970-е гг. была создана единая релятивистская теория движения внутренних планет [17, 44], использовавшаяся для навигационного обеспечения экспериментов в космосе.

В США численные теории движения больших планет разрабатывались в Массачусетском технологическом институте [46] и в Лаборатории реактивного движения (JPL) [99].

В настоящее время две динамические модели движения планет, продолжающие свое развитие, — серии эфемерид DE/LE (Development Ephemeris/Lunar Ephemeris, JPL) [119] и EPM (Ephemerides of the Planets and the Moon, Институт прикладной астрономии РАН (ИПА РАН)) [28], — имеют уровень точности, отвечающий современным радиотехническим и лазерным наблюдениям.

Вычисление высокоточных эфемерид планет, соответствующих метровому уровню точности радарных наблюдений планет и космических аппаратов и необходимых для навигационного обеспечения космических экспериментов, требует создания модели движения планет на основе ОТО.

В численных эфемеридах серий DE/LE и EPM релятивистские уравнения движения Солнца, планет и Луны записываются в постньютоновском приближении ОТО в гармонической системе координат. Выполняется численное интегрирование уравнений движения Солнца, девяти больших планет, Луны с учетом физической либрации, нескольких малых планет.

Современные версии эфемерид DE405/LE405 [121, 122] (–1410 – 3000 гг.) и EPM2004 [103, 104, 29] (1886–2011 гг.) различаются уравнениями лунной либрации, моделированием возмущений астероидов, системами отсчета для построения эфемерид, наборами наблюдений, по которым уточняются параметры теорий.

Резолюции XXIV Генеральной ассамблеи МАС рекомендуют использовать эфемериды DE405/LE405 в национальных ежегодниках. В российском Астрономическом ежегоднике, начиная с выпуска на 2004 г., планетные и лунные эфемериды основываются на эфемериде DE405/LE405 [28].

Численная теория ЕРМ используется как эфемеридная основа «Дополнений к Астрономическому ежегоднику» [28].

Высокоточные численные теории движения планет Солнечной системы серий DE/LE и ЕРМ предназначены для решения задач эфемеридного обеспечения. Они позволяют определять координаты планет с метровой точностью, но интервал времени, охватываемый этими теориями, не превышает 6000 лет: от -3000 до 3000 гг. (эфемериды DE406/LE406 [120] являются сжатым вариантом DE405/LE405 и охватывают интервал от -3000 до 3000 гг.).

Рассмотрим теории, позволяющие исследовать эволюцию орбит больших планет на длительных интервалах времени.

Численные модели орбитальной эволюции Солнечной системы на длительных интервалах времени

От Юпитера до Плутона

Исследование эволюции орбит внешних планет Солнечной системы представляет интерес по нескольким причинам. Во-первых, планеты-гиганты играют важную, часто определяющую, роль в динамической эволюции Солнечной системы в целом. Неустойчивость внешней части Солнечной системы катастрофически отразится на орбитах всех планет, а результаты интегрирования уравнений движения внешних планет с учетом и без учета влияния внутренних планет различаются незначительно. Во-вторых, большие периоды обращения внешних планет позволяют интегрировать их движение с большим шагом по времени. Это позволяет при сравнимых затратах компьютерных ресурсов исследовать поведение внешних планет на значительно более длительных интервалах времени, чем эволюцию орбит планет земной группы. В-третьих, в 60–80-е гг. прошлого столетия актуальной задачей являлось исследование особенностей движения Плутона.

Численное интегрирование уравнений движения пяти внешних планет на интервалах времени 120 тыс. лет [60], 1 млн лет [61], 5 млн лет [70] показало, что либрационное движение перигелия Плутона с учетом соизмеримости средних движений Плутона и Нептуна ис-

ключает тесные сближения этих планет. Результаты интегрирования для нерезонансных значений большой полуоси орбиты Плутона [70] свидетельствуют, что выход Плутона из резонанса с Нептуном ведет к нерегулярной и хаотической эволюции орбиты Плутона.

Для исследования эволюции орбит пяти внешних планет на интервале времени, превышающем 200 млн лет, был специально разработан и изготовлен параллельный компьютер «Digital Orrery» («Цифровая модель Солнечной системы»). Основные результаты получены при интегрировании вперед и назад на 106 776 073.9 лет, так что полный интервал интегрирования составил 213 552 147.8 лет [45]. Анализ изменения элементов орбиты Плутона показал, что аргумент перигелия Плутона либрирует относительно значения 90° с периодом 3.796 млн лет, а амплитуда либрации модулируется колебаниями, имеющими период около 34 млн лет. На рассмотренном интервале времени признаков хаотической эволюции орбиты Плутона и внешних планет Солнечной системы в целом не обнаружено.

Проект LONGSTOP (LONG term Gravitational Stability Test for the Outer Planets) — международная программа исследования устойчивости Солнечной системы на интервалах времени, сравнимых с ее возрастом [110]. В ходе выполнения проекта получены решения: LONGSTOP 1A [94, 95, 55] (интервал 9.3 млн лет: на 4.65 млн лет в прошлое и будущее) и LONGSTOP 1B [102] (интервал 100 млн лет: на 50 млн лет в прошлое и будущее). Вычисления проводились в компьютерном центре Университета Лондона на компьютере CRAY 1S. Анализ решения [95] выявил долгопериодические возмущения больших полуосей Урана и Нептуна, происходящие в противофазе. Период этих возмущений 1 119 416 лет совпадает с периодом обмена угловым моментом между Ураном и Юпитером. Появление в вековой теории долгопериодических возмущений большой полуоси связано с квази-резонансом средних движений 2 : 1 между Ураном и Нептуном.

В результате выполнения проекта LONGSTOP сделан вывод, что Солнечная система макроскопически устойчива: отсутствуют существенные отклонения от квазипериодического поведения, не обнаружены большие изменения эксцентриситетов и т. п. Внешняя часть Солнечной системы на интервале времени 100 млн лет проявила свойства, характерные для области нерегулярного движения в фазовом пространстве неинтегрируемой динамической системы [102]. И хотя ширина стохастического слоя мала, построение вековой теории возмущений, применимой на интервале времени несколько милли-

ардов лет, является очень трудной задачей. Особо отметим вывод, что интервал 100 млн лет является предельным для интегрирования уравнений движения внешних планет Солнечной системы [96].

Все девять планет

Совместное интегрирование уравнений движения девяти больших планет — от Меркурия до Плутона — существенно более трудоемкая задача, чем исследование внешней области Солнечной системы. Необходимо учитывать 45 взаимодействий между планетами и Солнцем вместо 15 для внешних планет. Самый малый орбитальный период почти в 50 раз короче (0.24 года для Меркурия вместо 11.86 года для Юпитера). Эксцентриситет ближайшей к Солнцу планеты в настоящее время равен $e = 0.206$ (для орбиты Юпитера $e = 0.048$). Все это делает задачу точного интегрирования уравнений движения планет значительно более трудной.

Первые результаты были получены для интервалов времени 2 млн лет (на 1 млн лет в прошлое и будущее) [106] и 3 млн лет (восемь больших планет, исключая Меркурий) [45]. Увеличение интервала интегрирования почти на 3 порядка по сравнению с численными теориями серии DE достигнуто за счет уменьшения точности результатов, в первую очередь это касается определения положения планет на орбитах. Точность описания эволюции самих планетных орбит достаточна для исследования их эволюции на столь длительных интервалах.

В работе [105] была поставлена задача обеспечить точность предсказания положения планет на орбитах не хуже 1 рад на интервале времени 3 млн лет. Исключение составили Меркурий и Плутон, для которых ошибки достигают нескольких радиан. Для барицентра системы Земля–Луна в конце интервала интегрирования достигнута точность 0.03 рад. Для обеспечения заданного уровня точности релятивистские эффекты, обусловленные Солнцем, учитывались в постпостньютоновском приближении. Уменьшение массы Солнца за счет электромагнитного излучения моделировалось путем внесения поправки в шкалу времени. Интегрирование выполнялось на интервале 9252.96 юлианских лет вперед и 3.056 млн юлианских лет назад от эпохи JD2433280.5. По результатам интегрирования сделан вывод,

что движение всех планет на рассмотренном интервале времени имеет регулярный характер. Показано, что оценка времени Ляпунова должна превышать 1 млн лет, что согласуется с результатами Ласкара, оценившего время Ляпунова для внутренних планет в 5 млн лет [81].

Численное интегрирование уравнений движения планет на интервале времени несколько десятков миллионов лет выполнено в работе [126]. Оценка времени Ляпунова для внутренних планет составила 4 млн лет. Хаотические свойства движения внутренних планет, приводящие к снижению точности получаемого решения, ограничивают интервал интегрирования отрезком 50 млн лет в прошлое. Для внешних планет на интервале интегрирования 90 млн лет признаков хаотического движения не обнаружено. Получена нижняя граница оценки времени Ляпунова для внешних планет — 30 млн лет.

Интегрирование на миллиарды лет: хаос в движении планет

Первые результаты интегрирования уравнений движения внешних планет на интервале времени, близком к 1 млрд лет, выявили хаотические свойства в движении Плутона [123]. Проверка полученных результатов требовала проведения большого числа расчетов, чтобы выяснить зависимость хаотических характеристик движения планет от точности задания начальных условий и параметров. Исследователи последовали правилу: если невозможно увеличить производительность компьютеров, то следует улучшить метод решения задачи.

Висдом и Холман предложили метод симплектических отображений для задачи N тел [128]. Гамильтониан задачи представляется в виде

$$H = H_0 + H_1,$$

где H_0 — гамильтониан задачи двух тел; H_1 — возмущающий гамильтониан, учитывающий взаимные возмущения тел. Гамильтониан отображения H_{Map} для задачи N тел получается включением в гамильтониан H высокочастотных слагаемых

$$H_{Map} = H_0 + 2\pi\delta_{2\pi}(\beta t)H_1,$$

где β — частота отображения, имеющая тот же самый порядок, что и частота орбитального движения; $\delta_{2\pi}(t)$ — периодическая последовательность δ -функций с периодом 2π :

$$\delta_{2\pi}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - 2\pi n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos nt.$$

Фактически метод симплектических отображений является симплектическим интегратором [127, 89]. Применение симплектического интегратора позволяет на порядок и более увеличить шаг интегрирования и исследовать эволюцию планетных орбит на более длительных интервалах времени, чем те, которые доступны численному интегрированию.

Сравнение симплектического решения для внешних планет на интервале 1.1 млрд лет [128] с данными, полученными численным интегрированием на 845 млн лет [123], показало, что в этом решении воспроизведены все принципиальные результаты. Кроме того, в решении для наклона орбиты Плутона обнаружены долгопериодические колебания с периодом, превышающим 1 млрд лет. Оценка времени Ляпунова для Плутона оказалась близкой к 20 млн лет. Двукратное вычисление положительного показателя Ляпунова по результатам, полученным на разных компьютерах, с разным шагом интегрирования, при использовании различных алгоритмов интегрирования позволило сделать уверенный вывод о том, что движение Плутона хаотично.

Метод симплектических отображений был применен для исследования эволюции орбит планет Солнечной системы на интервале времени 100 млн лет [124, 127]. Вычисления проводились на многопроцессорной системе «Supercomputer Toolkit» (наследник «Digital Orrery»). Оценки времени Ляпунова, полученные путем вычисления расстояний между соседними траекториями в пространстве элементов орбит, составили для внутренних планет 4 млн лет, для внешних планет и Плутона 12 млн лет, что меньше оценок на основе старшего показателя Ляпунова (5 млн лет для внутренних планет [81] и 15–20 млн лет для внешних планет [128]).

Для исследования хаотического поведения внешних планет Солнечной системы была выполнена серия расчетов как с помощью интегратора Штермера (на 100 и 400 млн лет), так и с помощью симплектического отображения (на 300 млн лет) при разных значениях шага интегрирования. Оценки времени Ляпунова для внешних планет (исключая Плутон) лежат в интервале от 3 млн до 30 млн лет и сложным образом зависят от начальных условий и шага интегрирования. Для одного варианта получено квазипериодическое решение.

Оценки времени Ляпунова для Плутона изменяются от 10 до 20 млн лет и не зависят от степени хаотизации движения планет-гигантов. Движение Плутона хаотично для всех рассмотренных начальных условий.

Детальное исследование особенностей движения Плутона на интервалах времени, превышающих возраст Солнечной системы, выполнено в работах [72, 73]. Уравнения движения внешних планет интегрировались на 5.7 млрд лет в прошлое и на 5.5 млрд лет в будущее с помощью линейного симметричного многошагового симплектического интегратора [71]. Результаты интегрирования не выявили в движении Плутона признаков гросс-неустойчивости. Зафиксирована экспоненциальная расхожимость близких к орбите Плутона траекторий на начальном отрезке интегрирования 420 млн лет, после чего наступает насыщение вследствие наличия четырех резонансов.

Исследование орбитальной эволюции Солнечной системы на самых длительных интервалах времени выполнено Ито и Таникавой [67, 68]. Эволюция орбит девяти больших планет Солнечной системы рассмотрена на интервалах времени в несколько миллиардов лет, эволюция орбит пяти внешних планет — на интервалах ± 50 млрд лет. В модели сил учитывалось только ньютоновское гравитационное взаимодействие между рассматриваемыми телами. Уравнения движения интегрировались методом симплектических отображений второго порядка [128]. Общее время, затраченное на проведение вычислений на нескольких персональных компьютерах и рабочих станциях, превысило 5 лет.

Получено, что движение планет Солнечной системы устойчиво по Хиллу на интервалах времени ± 4 млрд лет: нет тесных сближений планет, а значения частот изменения элементов их орбит лежат в узких пределах. Однако движение планет стохастично.

Для внутренних планет показана возможность диффузии значений элементов орбит, в первую очередь эксцентриситетов и наклонов. В частности, для Меркурия подтверждена возможность роста эксцентриситета орбиты до значений $e \sim 0.35$ на интервале, превышающем ± 4 млрд лет, что согласуется с результатами [85].

Результаты интегрирования уравнений движения пяти внешних планет на интервале ± 50 млрд лет показали устойчивость движения планет-гигантов на всем рассматриваемом промежутке времени. Описывая данный результат, авторы работ [67, 68] отмечают, что он

получен для динамической системы, состоящей из точечных масс. И устойчивость этой системы еще не гарантирует, что реальная Солнечная система будет действительно существовать в течение столь длительного времени.

Исследование эволюции орбиты Плутона на интервале ± 50 млрд лет показало, что устойчивость движения Плутона обеспечивается тремя из четырех основных резонансов с Нептуном, описанных в [73]. Сделан вывод, что три основных резонанса в системе Нептун–Плутон сохраняются на всем интервале времени 100 млрд лет.

Анализируя свой основной результат об устойчивости исследуемой планетной системы [68], Ито и Таникава отмечают две основные причины этого явления. Первая — отсутствие резонансов низкого порядка (как средних движений, так и вековых) между парами планет. Юпитер и Сатурн близки к резонансу средних движений 5:2 («большое неравенство»), но их орбиты лежат вне резонансной зоны. Резонансы высоких порядков могут быть источником хаотического движения планет, но они не настолько сильны, чтобы разрушить устойчивое движение планет за время жизни Солнечной системы. Вторая — различие в динамических расстояниях между планетами земной группы и планетами-гигантами. Расстояния между планетами земной группы превышают 26 радиусов Хилла R_H , а между планетами-гигантами расстояния меньше $14R_H$. Маломассивные планеты земной группы имеют малые периоды обращения и большие взаимные динамические расстояния. Они испытывают сильные возмущения со стороны планет-гигантов, имеющих большие массы, долгие орбитальные периоды и малые взаимные динамические расстояния. В свою очередь, планеты-гиганты не испытывают возмущений со стороны каких-либо других массивных тел. Большие взаимные динамические расстояния между планетами земной группы (более $26R_H$), вероятно, являются самыми важными условиями устойчивости планетной системы на интервале времени несколько миллиардов лет.

Современные аналитические и численно-аналитические теории

Применение численных методов позволило значительно продвигаться в описании динамической эволюции Солнечной системы. Однако численные методы обладают существенным недостатком: один численный эксперимент дает информацию лишь об одной из беско-

нечного числа возможных траекторий, исходящих из сколь угодно малой области фазового пространства. Современные аналитические теории позволяют получить справедливое в некоторой конечной области фазового пространства решение, представляя элементы орбит и (или) координаты в виде явных функций от времени и начальных данных, что существенно облегчает анализ динамических свойств системы.

Как правило, при построении теорий движения планет используются две системы оскулирующих элементов. В первой угловые элементы являются долготами:

$$a, e, i; \lambda, \pi, \Omega, \quad (13)$$

где λ — средняя долгота в орбите. Вторая система включает элементы типа (6)

$$\begin{aligned} a, & \quad \lambda, \\ h = e \cos \pi, & \quad k = e \sin \pi, \\ p = \sin(i/2) \cos \Omega, & \quad q = \sin(i/2) \sin \Omega. \end{aligned} \quad (14)$$

В общих N -планетных теориях решение представляется в виде рядов Фурье по аргументам

$$\Psi = \sum_{j=1}^N b_j \alpha_j + \sum_{j=1}^N c_j \beta_j + \sum_{j=1}^N d_j \gamma_j. \quad (15)$$

Здесь α — осредненная средняя долгота λ ; β и γ — аргументы решения вековой системы Лапласа—Лагранжа (7) по эксцентриситету и наклону соответственно; b_j, c_j, d_j — целые числа. Для j -й планеты

$$\sigma_j = \sigma_j^0 + \sum A_{\Psi,j} \left\{ \begin{smallmatrix} \cos \\ \sin \end{smallmatrix} \right\} \Psi, \quad \lambda_j = \alpha_j + \sum B_{\Psi,j} \sin \Psi. \quad (16)$$

Здесь σ обозначает любой элемент систем (13), (14), кроме средней долготы λ ; σ^0 — среднее значение элемента σ . В формуле для σ косинус берется для переменных a, e, i, k, q , синус — для π, Ω, h, p .

В классических планетных теориях решение представляется в виде рядов Пуассона по осредненным средним долготам α .

$$\sigma_j = \sum_{s=0}^l \sigma_j^s t^s + \sum_{s=0}^l t^s S_j^s, \quad \lambda_j = \lambda_j^0 + n_j t + \sum_{s=2}^l \lambda_j^s t^s + \sum_{s=0}^l t^s L_j^s, \quad (17)$$

где t — время (в зависимости от теории: барицентрическое динамическое время, барицентрическое координатное время и т. д.); $\sigma_j^s, \lambda_j^0, n_j, \lambda_j^s$ — числовые коэффициенты; S_j^s, L_j^s — ряды Фурье по осредненным средним аномалиям α_j .

Решение в «средних элементах» $\langle \sigma_j \rangle, \langle \lambda_j \rangle$, соответствующее вековой части классической планетной теории (17), может быть также получено путем разложения в ряд по степеням времени решения общей планетной теории (16)

$$\langle \sigma_j \rangle = \sum_{s=0}^l \sigma_j^s t^s, \quad \langle \lambda_j \rangle = \lambda_j^0 + n_j t + \sum_{s=2}^l \lambda_j^s t^s. \quad (18)$$

Численно-аналитические теории основаны на численном интегрировании аналитически осредненных уравнений движения. В этом случае шаг интегрирования может быть соизмерим с периодами изменения медленных переменных. Появляется возможность исследовать особенности движения планет на интервалах времени до нескольких десятков миллиардов лет.

Основным математическим объектом при выполнении аналитических преобразований являются ряды Пуассона (ряды Фурье с коэффициентами в виде рядов Тейлора). Специализированные системы для работы с рядами Пуассона носят название пуассоновских и кеплеровских процессоров [6, 53].

Общие теории движения планет

Лаплас и Лагранж решили эволюционные уравнения (7) в линейном приближении (8) по массам, эксцентриситетам и наклонам. Дальнейшие работы, выполненные в этом направлении, позволили учесть и высшие порядки [51, 43, 64, 2, 8, 18].

Разработка общей теории движения планет в прямоугольных координатах с точностью до членов третьего порядка относительно возмущающих масс выполнялась в Институте теоретической астрономии АН СССР (ИТА АН СССР) [5, 52, 7, 54].

В Бюро долгот (Париж, Франция) разработано несколько серий аналитических теорий движения больших планет [57, 58, 112, 47, 59].

Аналитические эфемериды

В ИТА АН СССР построена аналитическая теория движения внутренних планет АТ-1 [19].

Теория движения внутренних планет второго порядка относительно возмущающих масс [48], построенная в Бюро долгот, является развитием работ [113, 114].

В Бюро долгот также создан ряд теорий движения внешних планет. Теория движения четырех внешних планет TOP82 (Theory of Outer Planets) [111] включает возмущения внешних планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) до третьего порядка по массам [115], а также возмущения до седьмого порядка для пары планет Юпитер — Сатурн [116]. Релятивистские возмущения представлены в изотропных и стандартных координатах [91].

На основе решения TOP82 разработана теория движения Юпитера и Сатурна JASON84 (Jupiter And Saturn Orbits from Neolithic) [117], обеспечивающая высокую точность вычисления эфемерид на интервале 6000 лет (от -4000 до $+2000$ гг.)

В дальнейшем решения TOP82 и JASON84 послужили основой теории движения внешних планет JSUN1 [118].

Аналитическая теория движения восьми планет VSOP2000 (la version 2000 des Variations Séculaires des Orbites Planétaires) [97] — результат развития серии решений VSOP82 [49] и VSOP87 [50], разрабатываемых в Бюро долгот. При построении теории учитывались взаимные возмущения планет (до восьмого порядка относительно масс планет), а также возмущения, производимые Плутоном и пятью астероидами (Церера, Паллада, Веста, Ирида, Бамберга). Возмущения от Луны с точностью до второго порядка относительно масс учитывались в решениях для внутренних планет и барицентра Земля–Луна. Теория включает обусловленные Солнцем релятивистские эффекты в постньютоновском приближении. Постоянные интегрирования сначала были определены путем согласования аналитического решения с численной теорией DE200, а затем уточнялись на основе сравнения с наблюдениями. Решение получено в системе элементов (14). Каждый элемент представляется рядами Фурье и Пуассона до 8-го порядка. Разность между теориями VSOP2000 и DE200 на интервале 100 лет составляет: по большой полуоси от 6 м для Меркурия до 47 м для Нептуна, по средней долготе от 0.0003 — $0.0004''$

для Меркурия, Венеры и Земли до $0.002''$ для Нептуна. Максимальная разность в средней долготе $0.00289''$ достигается для Марса, что указывает на необходимость уточнения метода учета возмущений от астероидов.

Теория движения больших планет, основанная на универсальном методе вычисления возмущающей функции, построена в [12].

Численно-аналитические теории орбитальной эволюции Солнечной системы на больших интервалах времени

Для исследования вековых вариаций элементов орбит на длительных интервалах времени удобно использовать двукратно осредненный вариант ограниченной задачи трех тел, именуемый задачей Гаусса. Осреднение по Гауссу не требует разложений по степеням эксцентриситета или наклона в отличие от классической теории вековых возмущений. Метод Гаусса для многопланетной задачи, по видимому, впервые применен в [15]. В работах [9–11] обнаружены новые стационарные решения, соответствующие сильноэксцентрическим орбитам, ортогональным к плоскости орбиты возмущающего тела.

Развитием метода Гаусса является метод Альфана–Горячева вычисления вековых возмущений первого порядка на основе двукратного осреднения компонент возмущающего ускорения по двум быстрым переменным: средним аномалиям возмущающего и возмущаемого тел. В работе [33] метод Альфана–Горячева модифицирован для системы переменных типа (14), исключающей особенности при малых эксцентриситетах и наклонах. Исследованы взаимные вековые возмущения внешних планет на интервале времени 800 тыс. лет [34] и вековые возмущения девяти планет на интервале 200 тыс. лет [35].

Серия работ Ласкара [77–80] посвящена построению теории вековой эволюции Солнечной системы. Поскольку в решении присутствуют малые знаменатели, аналитическое интегрирование полученной системы является весьма сложной задачей. С другой стороны, численное интегрирование вековой системы позволяет получить решение на большом интервале времени с высокой точностью при умеренных затратах вычислительных ресурсов. Периоды функций, входящих в вековую систему, превышают 50 тыс. лет, что позволяет выбрать шаг интегрирования более 1000 лет.

Численное интегрирование вековой системы [78, 79] на интервале 30 млн лет (от -10 до $+20$ млн лет) выполнено в работе [80]. Ин-

тегрирование выполнялось на суперкомпьютере CRAY-1. Выявлена большая стабильность внешней части Солнечной системы по сравнению с внутренней, где обнаружены близкие к резонансным частоты, ухудшающие сходимость решения. Решения для Меркурия и Марса демонстрируют возможность неустойчивой эволюции орбит. Сделан вывод, что для точного определения долгопериодических частот в решении для внутренних планет требуется получить решение на значительно более длительном интервале времени, по крайней мере 100 млн лет.

Интегрирование вековой системы на интервале 200 млн лет [81] выявило, что движение больших планет Солнечной системы хаотично с показателем Ляпунова, достигающим значения $1/5$ (млн. лет) $^{-1}$. Это означает, что реальное движение планет Солнечной системы можно проследить на интервале не более 100 млн лет. Точность начальных условий должна быть на уровне 10^{-10} , а модель возмущающих сил должна соответствовать этой точности. В частности, необходимо принимать во внимание возмущения от примерно трех дюжин астероидов. Расширение интервала интегрирования до 120 млн лет требует обеспечения точности на уровне 10^{-12} и учета возмущений от нескольких сотен астероидов.

Смысл интегрирования уравнений движения на интервалах времени, превышающих 100 млн лет, состоит в исследовании возможных движений в хаотической области, в которой находятся планеты Солнечной системы.

На интервале времени 200 млн лет хаотическое поведение проявляется в основном для внутренних планет. Его причиной являются два ранее не известных вековых резонанса в орбитальном движении внутренних планет [82].

Следующим шагом стало интегрирование вековой системы на интервале 400 млн лет (по 200 млн лет в прошлое и будущее) [83]. В результате интегрирования осредненных уравнений движения не обнаружено каких-либо катастрофических изменений элементов орбит планет. Движение внешних планет близко к квазипериодическому. Изменение эксцентриситетов орбит Земли и Венеры близко к регулярному, поскольку оно связано с собственными модами Юпитера и Сатурна. Хаотическое поведение проявляется в эволюции наклонов орбит Земли и Венеры и составляет около 1° на интервале 200 млн лет. Хаотические эффекты в эволюции орбит Марса и Меркурия более заметны и достигают для Марса 0.02 в эксцентриситете и более 1° в наклоне, для Меркурия соответственно 0.05 и более 2° . Эти из-

менения элементов орбит свидетельствуют о возможности больших изменений элементов орбит на более длительных интервалах времени. Сделан вывод, что наблюдаемые значения эксцентриситета и наклона орбиты Меркурия могут быть следствием эволюции от первоначально умеренных значений. Выявлено перекрытие зон вековых резонансов, что объясняет наличие широкой хаотической зоны, которая не ограничивается малой областью в окрестности сепаратрисы одиночного резонанса.

Численное интегрирование осредненных уравнений движения планет (получены в [78]) с близкими начальными условиями на интервалах времени, превышающих возраст Солнечной системы, выполнено в работе [85]. Уравнения интегрировались на 10 млрд лет в прошлое и на 15 млрд лет в будущее с целью исследования хаотической зоны, в которой эволюционирует Солнечная система. Если некоторое событие будет обнаружено в момент времени, превышающий 100 млн лет, например в точке 10 млрд лет, это будет означать, что существует вероятность реализации данного события в любой момент времени, отстоящий от начального более чем на 100 млн лет как в прошлое, так и в будущее. Результаты интегрирования выявили регулярное движение внешних планет. С другой стороны, максимальные значения эксцентриситетов и наклонов внутренних планет показывают большие и нерегулярные вариации, которые свидетельствуют об их диффузии в зоне хаоса. Диффузия эксцентриситетов Земли и Венеры умеренная 0.02. Диффузия эксцентриситета Марса больше и превышает 0.12, приводя к значениям эксцентриситета, превышающим 0.2. Для Меркурия зона хаоса настолько большая (более 0.4), что наибольшее значение эксцентриситета превышает 0.5. Наклоны планет ведут себя подобным образом.

Достижение эксцентриситетом орбиты Меркурия значения 0.5 недостаточно для пересечения орбит Меркурия и Венеры. В работе [85] выполнено исследование возможности ухода Меркурия из Солнечной системы. Рассматривался набор нескольких траекторий с очень близкими начальными условиями. Четыре решения с начальными условиями, в которых положение Земли различается на 150 м (10^{-9} в эксцентриситете), вычислялись на интервале 500 млн лет. Затем выбиралось решение с максимальным значением эксцентриситета Меркурия и из его окрестности стартовала следующая четверка решений. Эксцентриситет Меркурия достиг значения, близкого к 1, вблизи момента времени -6 млрд лет.

Аналогичное интегрирование вперед по времени при варьировании начальных значений на 15 м выявило подобное увеличение эксцентриситета при достижении момента 3.5 млрд лет.

Одновременно с ростом эксцентриситета происходит увеличение наклона орбиты. Моделирование показывает, что даже и в этом случае возможны сближения узлов орбит Меркурия и Венеры, которые могут привести к уходу Меркурия из Солнечной системы. Основной вывод состоит в том, что Меркурий может покинуть Солнечную систему на интервале времени, меньшем, чем возраст Солнечной системы.

Исследование возможности аналогичного сближения для Земли и Марса не привело к решению с уходом одной из планет [86, 87]. На интервале 5 млрд лет максимальные значения эксцентриситетов орбит Земли и Марса достигли значений 0.1 и 0.25 соответственно. При таких эксцентриситетах орбит возможны тесные сближения Земли и Марса. Высказано предположение [86, 87], что при интегрировании полной (неосредненной) системы уравнений может быть получено решение, приводящее к уходу Марса.

Исследование областей возможных движений внутренних планет с учетом диффузии эксцентриситетов их орбит показало, что внутренняя часть Солнечной системы от 0 до 2 а. е. заполнена [86, 87]. Остаются только две малые области между орбитами Венеры и Земли, Земли и Марса, которые пока недоступны орбитам внутренних планет. Если во внутреннюю область добавить еще одну планету, то ее столкновение с уже существующими планетами будет весьма вероятным.

Область внешних планет также заполнена, хотя диффузия их орбит очень мала. Добавление новых объектов в эту область приводит к выбросу объектов на интервалах времени, не превышающих 5 млрд лет [86, 87]. Динамическая граница области внешних планет простирается примерно до 40 а. е.

Долгопериодическая эволюция двупланетных систем

Устойчивость пространственной планетной задачи трех тел была исследована с применением КАМ-теории. В работе [107] доказана устойчивость для очень малых значений масс планет, наклонов и эксцентриситетов их орбит. Влияние вековых резонансов на устойчивость задачи была изучена в [108] с помощью численного метода частотного анализа [84]. Выявлено, что вековые резонансы

не вызывают неустойчивости в двухпланетных системах, подобных паре Юпитер—Сатурн. В работе [88] реализован метод разложения возмущающей функции двухпланетной задачи с использованием коэффициентов Лапласа. Этот подход позволил получить следующий результат [109]: *если массы планет и эксцентриситеты их орбит достаточно малы, отношение больших полуосей заключено в интервале $]0, 0.8]$ и взаимный наклон орбит двух планет менее 1° , тогда для большинства начальных условий планетный вариант задачи трех тел приводит к квазипериодическим траекториям.* Это важный результат, хотя условия еще довольно далеки от реальных, реализуемых в Солнечной и других планетных системах.

Исследование устойчивости двухпланетной системы Солнце—Юпитер—Сатурн методами КАМ-теории показало, что гамильтониан приближенной вековой модели порождает два инвариантных тора, окружающих орбиты с начальными данными Юпитера и Сатурна [93]. Следовательно, в рамках двухпланетной задачи орбиты Юпитера и Сатурна устойчивы на бесконечном интервале времени.

Серия статей [41, 42, 22, 23] посвящена изучению эволюции слабозвозмущенных двухпланетных систем. Динамическая эволюция двухпланетной системы Солнце—Юпитер—Сатурн исследована путем численного интегрирования осредненной системы на интервале времени 10 млрд лет [74, 75, 76, 23]. Показано, что движение планет имеет почти-периодический характер. Эксцентриситеты и наклоны орбит Юпитера и Сатурна остаются малыми, а их значения отделены от нуля. Короткопериодические возмущения сохраняются малыми на всем рассмотренном интервале времени.

Хаос в Солнечной системе: причины и проявление в движении планет

Классические аналитические теории движения планет показывают, что их движение устойчиво и почти-периодично. Численные и численно-аналитические теории указывают на то, что движение планет хаотично. Хаотизация движения связана с наличием резонансов как средних движений, так и вековых.

Как показано в работе [125], источником хаотического поведения пары Юпитер—Сатурн является близость средних движений планет к резонансу $2 : 5$ («большое неравенство»). Определяющую роль в проявлении хаотических свойств играет начальное значение фундаментальной частоты, связанной с движением перицентра орби-

ты Сатурна. Наиболее сильно хаотические свойства движения проявляются, когда период «большого неравенства» увеличивается до 2000 лет. Результаты моделирования показывают наличие дрейфа между квази-периодическим и хаотическим движением системы.

Источником хаотического движения внешних планет является перекрытие компонент тройного резонанса средних движений Юпитера, Сатурна и Урана [98]. Размеры резонансных зон компонент и расстояния между резонансными компонентами для большой полуоси орбиты Урана одного порядка. Время Ляпунова для Урана не превосходит 10 млн лет. Стохастическая эволюция орбиты Урана приводит к случайному блужданию эксцентриситета его орбиты между 0 и 0.5. При $e > 0.5$ Уран будет испытывать тесные сближения с Сатурном и может быть выброшен из Солнечной системы. Динамическое время жизни Урана составляет 10^{18} лет.

Подробный обзор работ, посвященных проблеме хаоса в Солнечной системе, проведен в [92, 90].

Влияние тройных резонансов на устойчивость внешних планет рассмотрено в работах [62, 63]. Показано, что распределение резонансных областей по большим полуосям орбит всех планет сочетается с орбитальной неустойчивостью. В частности, размер перекрытия резонансных областей в окрестности орбит Урана и Нептуна составляет 10^{-3} а. е. Современное состояние Солнечной системы соответствует положению на краю этой области перекрытия резонансов. Однако Уран и Нептун испытывают очень медленные систематические изменения большой полуоси со скоростью 10^{-4} а. е./млрд лет). Хотя эта неустойчивость и не ведет к драматическим изменениям, она важна тем, что проявляется на космогонических интервалах времени и заставляет пересмотреть идею о «замороженной» динамике Солнечной системы.

Однако однозначно ответить на вопрос о характере движения внешних планет Солнечной системы нельзя, так как решения, получаемые разными авторами, дают противоречивые результаты. Численное интегрирование осредненных уравнений движения [82] не выявило признаков хаотического движения внешних планет. Результаты [98, 62, 63] показали наличие начальных условий, приводящих к хаотическим решениям для внешних планет Солнечной системы. Для части начальных данных, использованных в [98], были получены регулярные решения.

В работах [100, 101] исследована зависимость получаемых оценок показателей Ляпунова и времени Ляпунова от шага интегрирования для наиболее употребительных симплектических интеграторов. При интегрировании уравнений движения внешних планет Солнечной системы симплектическим интегратором Виздома—Холмана второго порядка при шаге 400 сут. получена оценка времени Ляпунова от 5 до 12 млн лет. Уменьшение шага интегрирования до 200, 100, 50 сут. позволило получить регулярные решения. Однако есть и обратные примеры, когда хаотические свойства решений сохранялись при уменьшении шага интегрирования [65].

В работе [66] предпринята попытка разрешения этой дилеммы. На интервале времени 200 млн лет рассмотрено движение внешних планет с учетом только ньютонова гравитационного взаимодействия. Массы внутренних планет были прибавлены к массе Солнца. Учет потери массы Солнца не влиял на получаемые результаты. Интегрирование выполнялось для 21 набора начальных данных, полученного по численной эфемериде DE405 [120] (интервал между начальными эпохами 30 сут.), для данных из работы [98] и др. Чтобы уменьшить зависимость получаемых результатов от применяемых методов численного интегрирования, использовались три различных интегратора: Mercury 6.2 [56] (метод симплектических отображений Виздома—Холмана), NBI [126] (метод Коуэла—Штермера 14-го порядка), Taylor 1.4 [69] (разложение правых частей уравнений в ряд Тейлора произвольного порядка). Начальное расстояние между соседними траекториями составляло 10^{-14} а. е. (1.5 мм). Выполнялось несколько циклов вычислений с различным шагом интегрирования. Обнаружено, что различным начальным эпохам могут соответствовать как хаотические, так и регулярные решения. Показано, что возмущения от внутренних планет превышают «расстояния» между начальными данными, соответствующими хаотическим и регулярным движениям и расположенным в области неопределенности, определяемой точностью наблюдений. Вопрос о том, какой области начальных условий, регулярной или хаотической, принадлежат начальные данные, описывающие фактическую Солнечную систему, остается открытым.

Заключение

В последние десятилетия достигнут впечатляющий прогресс в построении теорий движения главных тел Солнечной системы с макси-

мально возможной точностью на коротких временах порядка $10-10^3$ лет. Характерные погрешности снизились до долей метра для Луны, десятков или сотен метров для планет земной группы и десятков или сотен километров для планет-гигантов. Это стало возможным благодаря появлению новых высокоточных измерительных средств и средств обработки измерений. Высокая точность требует адекватного учета эффектов, которыми раньше можно было пренебречь.

Не меньший прогресс наблюдается в решении задачи об эволюции Солнечной системы на космогонических временах. Можно считать твердо установленными следующие свойства.

- На временах порядка 10^3 лет Солнечная система практически неизменна и ее динамика полностью предсказуема. В силе лапласов детерминизм.
- На временах порядка 10^6 лет движение больших планет Солнечной системы почти-периодично. Амплитуды колебаний больших полуосей имеют порядок μ , отношения масс Юпитера и Солнца. Амплитуды колебаний наклонов и эксцентриситетов имеют порядок $\sqrt{\mu}$. Поведение орбит полностью предсказуемо, погрешности в фазах внешних планет достигают десятков минут, в фазах внутренних планет — десятков градусов, так что в подпространстве фаз постепенно возникает хаос.
- На временах в 10^8-10^9 лет движение все еще почти-периодично. Орбитальные характеристики внешних планет предсказуемы. Орбиты планет земной группы вступают в зону хаоса. За несколько миллиардов лет Меркурий может быть выброшен из системы. Информация о фазах теряется полностью.
- На временах порядка 10^{10} лет движение внутренних планет полностью хаотично. Движение внешних планет почти-периодично, но орбитальные характеристики уже предсказываются с низкой точностью.
- Солнечная система полностью заполнена массивными планетами. Вставка дополнительной планеты приведет к неустойчивости и развалу системы.

Существенный прогресс достигнут в понимании роли резонансов (как средних движений, так и вековых) в динамике Солнечной системы. С одной стороны, под действием резонансов устойчивые конфигурации планет могут сохраняться на интервалах времени миллиарды лет (например, система Нептун—Плутон). С другой стороны,

перекрывание резонансов и соответствующих им стохастических слоев приводит к медленной диффузии динамической системы. И хотя эта неустойчивость проявляется лишь на космогонических интервалах времени, она заставляет пересмотреть идею о «замороженной» (в смысле неизменности больших полуосей планетных орбит) динамике Солнечной системы.

Относительная точность определения начальных данных теорий движения больших планет по результатам наблюдений составляет 10^{-7} . Вопрос о том, какой области начальных условий, регулярной или хаотической, принадлежат начальные данные, описывающие фактическую Солнечную систему, остается открытым.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-17408), Ведущей научной школы (грант НШ-4929.2006.2), аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)» Федерального агентства по образованию Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Аким Э. Л., Степаньянц В. А. Численная теория Земли и Венеры по данным радиолокационных, оптических наблюдений и наблюдений за движением искусственных спутников «Венера-9» и «Венера-10» // ДАН СССР. 1977. Т. 233. С. 314–317.
2. Анолик М. В., Красинский Г. А., Пиус Л. Ю. Тригонометрическая теория вековых возмущений больших планет // Тр. ИТА АН СССР. 1969. Т. 14. С. 3–47.
3. Арнольд В. И. Малые знаменатели и проблема устойчивости в классической и небесной механике // Успехи матем. наук. 1963. Т. 18, № 6. С. 91–192.
4. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний // в кн. Боголюбов Н. Н. Собрание научных трудов. М.: Математика и нелинейная механика, 2005. Т. 3.
5. Брумберг В. А. Численное построение обобщенной планетной теории // Астрон. журн. 1967. Т. 44, № 1. С. 204–216.
6. Брумберг В. А. Аналитические алгоритмы небесной механики. М.: Наука, 1980.

7. *Брумберг В. А., Егорова А. В.* Тригонометрическая линейная теория второго порядка вековых возмущений в движении больших планет // Наблюдения искусственных небесных тел. 1971. № 62. С. 42–72.
8. *Будникова Н. А.* Определение возмущений по методу Лапласа–Ньюкома на быстродействующих вычислительных машинах // Там же. С. 73–90.
9. *Вашковьяк М. А.* Количественные характеристики эволюции орбит в ограниченной круговой двукратноосредненной задаче трех тел: Препринт Ин-та приклад. математики АН СССР. № 157. М., 1979. 30 с.
10. *Вашковьяк М. А.* Эволюция орбит в ограниченной круговой двукратно осредненной задаче трех тел. 1. Качественное исследование // Космические исследования. 1981. Т. 19, Вып. 1. С. 5–18.
11. *Вашковьяк М. А.* Эволюция орбит в ограниченной круговой двукратно-осредненной задаче трех тел. 2. Количественные характеристики // Там же. Вып. 2. С. 165–177.
12. *Герасимов И. А., Чазов В. В., Рыжова Л. В. и др.* Построение теории движения тел Солнечной системы, основанной на универсальном методе вычисления возмущающей функции // Астрон. вестн. 2004. Т. 34, № 6. С. 559–566.
13. *Глебова Н. И.* Уточнение эфемерид внутренних планет на основе обработки оптических и радиолокационных наблюдений на интервале 1960–1980 // Бюл. ИТА АН СССР. 1984. Т. 15. С. 241–250.
14. *Гребеников Е. А., Рябов Ю. А.* Новые качественные методы в небесной механике. М.: Наука, 1971.
15. *Давыдов В. Л., Молчанов А. М.* Численные эксперименты в задаче об эволюции двухпланетной системы. Препринт Ин-та приклад. математики АН СССР. № 16. М., 1971. 30 с.
16. *Ерошкин Г. И., Глебова Н. И., Фурсенко М. А.* Дополнения 27–28А к «Астрономическому ежегоднику». СПб.: ИТА РАН, 1992. С. 1–8.
17. *Кислик М. Д., Колоса Ю. Ф., Котельников В. А. и др.* Единая релятивистская теория движения внутренних планет Солнечной системы // ДАН СССР. 1980. Т. 255. С. 545–547.

18. Красинский Г. А., Пиус Л. Ю. Вековые возмущения больших планет // Наблюдения искусственных небесных тел. 1971. № 62. С. 93–112.
19. Красинский Г. А., Питьева Е. В., Свешников М. А. и др. Аналитическая теория движения внутренних планет АТ-1 и ее использование для решения задач эфемеридной астрономии // Тр. ИТА АН СССР. 1978. Т. 17. С. 46–53.
20. Красинский Г. А., Питьева Е. В., Свешников М. А. и др. Некоторые результаты обработки радиолокационных, лазерных и оптических наблюдений внутренних планеты Луны // ДАН СССР. 1981. Т. 261. С. 1320–1324.
21. Красинский Г. А., Питьева Е. В., Свешников М. А. и др. Уточнение эфемерид внутренних планет и Луны по радиолокационным, лазерным и меридианным измерениям 1961–1980 гг. // Бюл. ИТА АН СССР. 1982. Т. 15. С. 169–175.
22. Кузнецов Э. Д., Холшевников К. В. Разложение гамильтониана двухпланетной задачи в ряд Пуассона по всем элементам: применение пуассоновского процессора // Астрон. вестн. 2004. Т. 38, № 2. С. 171–179.
23. Кузнецов Э. Д., Холшевников К. В. Динамическая эволюция слабовозмущенной двухпланетной системы на космогоническом интервале времени: система Солнце—Юпитер—Сатурн // Там же. 2006. Т. 40. №3. С. 263–275.
24. Левитан Б. М. Почти-периодические функции. М.: Гостехиздат, 1953.
25. Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. М.: Наука, 1966.
26. Нехорошев Н. Н. Экспоненциальная оценка времени устойчивости гамильтоновых систем, близких к интегрируемым // Успехи матем. наук. 1977. Т. 32, № 6. С. 5–66.
27. Нехорошев Н. Н. Экспоненциальная оценка времени устойчивости гамильтоновых систем, близких к интегрируемым, 2 // Тр. семинара И. Г. Петровского. 1979. Т. 5. С. 5–50.
28. Питьева Е. В. Современные численные теории движения Солнца, Луны и больших планет // Тр. ИПА РАН. Вып. 10. Эфемеридная астрономия. СПб.: Наука, 2004. С. 112–134.
29. Питьева Е. В. Высокоточные эфемериды планет — ЕРМ и определение некоторых астрономических постоянных // Астрон. вестн. 2005. Т. 39, № 3. С. 202–213.

30. Пуанкаре А. Лекции по небесной механике. М.: Наука, 1965.
31. Соколов Л. Л., Холшевников К. В. О представимости решений задачи трех тел условно-периодическими функциями. I, II // Астрон. журн. 1980. Т. 57, № 1. С. 168–177; № 2. С. 388–396.
32. Субботин М. Ф. Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968.
33. Сухотин А. А. Алгоритм метода Гаусса—Альфана—Горячева в лагранжевых переменных и его машинная реализация // Астрономия и геодезия. № 9. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. С. 67–73.
34. Сухотин А. А. Эволюция элементов орбит внешних планет на интервале времени 800 тысяч лет // там же. № 12. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. С. 80–91.
35. Сухотин А. А., Холшевников К. В. Эволюция планетных орбит за 200 тысяч лет, рассчитанная методом Альфана—Горячева // Там же. № 14. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1986. С. 5–21.
36. Холшевников К. В. Асимптотические методы небесной механики. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та., 1985.
37. Холшевников К. В. Сохранение формы интегралов площадей при осредняющих преобразованиях // Астрон. журн. 1991. Т. 68, № 3. С. 660–663.
38. Холшевников К. В. Точность эпициклической теории // Историко-астрономические исследования. Вып. 24. М.: Янус, 1994. С. 181–191.
39. Холшевников К. В. Даламберовские функции в небесной механике // Астрон. журн. 1997. Т. 74, № 1. С. 146–153.
40. Холшевников К. В. Гамильтониан планетной и спутниковой задачи как даламберовская функция // Там же. 2001. Т. 78, № 7. С. 669–672.
41. Холшевников К. В., Греб А. В., Кузнецов Э. Д. Разложение гамильтониана в ряд Пуассона по всем элементам (теория) // Астрон. вестн. 2001. Т. 3, № 3. С. 267–272.
42. Холшевников К. В., Греб А. В., Кузнецов Э. Д. Разложение гамильтониана двухпланетной задачи в ряд Пуассона по всем элементам: оценка и прямое вычисление коэффициентов // Там же. 2002. Т. 36, № 1. С. 75–87.

43. *Шараф Ш. Г., Будникова Н. А.* О вековых изменениях элементов орбиты Земли, влияющих на климаты геологического прошлого // Бюл. Ин-та теоретической астрономии АН СССР. 1967. Т. 11, № 4. С. 231–261.
44. *Akim E. L., Brumberg V. A., Kislik M. D. et al.* A relativistic theory of motion of inner planets // Proc. of the IAU Symp. № 114. Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry / Eds. J. Kovalevsky, V. A. Brumberg. Dordrecht: Kluwer, 1986. P. 63–68.
45. *Applegate J. H., Douglas M. R., Gürsel Y. et al.* The outer Solar System for 200 million years // Astron. J. 1986. Vol. 92. P. 176–194.
46. *Ash M. E., Shapiro I. I., Smith W. B.* Astronomical constants and planetary ephemerides deduced from radar and optical observations // Ibid. 1967. Vol. 72. P. 332–350.
47. *Bretagnon P.* Termes à longues périodes dans le Système Solaire // Astron. Astrophys. 1974. Vol. 30. P. 141–154.
48. *Bretagnon P.* Théorie au deuxième ordre des planètes inférieures // Ibid. 1980. Vol. 84. P. 329–341.
49. *Bretagnon P.* Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. Solution VSOP82 // Ibid. 1982. Vol. 114. P. 278–288.
50. *Bretagnon P., Francou G.* Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions // Ibid. 1988. Vol. 202. P. 309–315.
51. *Brouwer D., van Woerkom A. J. J.* The secular variations of the orbital elements of the principal planets // Astron. Papers Amer. Ephem. 1950. Vol. 13, pt. 2. P. 81–107
52. *Brumberg V. A.* Application of Hill's Lunar method in general planetary theory // Periodic Orbits, Stability and Resonances / Ed. G. E. O. Giacaglia. Dordrecht: Reidel, 1970. P. 410–450.
53. *Brumberg V. A.* Analytical Techniques of Celestial Mechanics. Heidelberg: Springer, 1995.
54. *Brumberg V. A., Chapront J.* Construction of a general planetary theory of the first order // Celest. Mech. 1973. Vol. 8. P. 335–356.
55. *Carpino M., Milani A., Nobili A. M.* Long-term numerical integrations and synthetic theories for the motion of the outer planets // Astron. Astrophys. 1987. Vol. 181. P. 182–194.

56. *Chambers J. E.* A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1999. Vol. 304. P. 793–799.
57. *Chapront J.* Construction d’une théorie littérale planétaire jusqu’au second ordre des masses // Astron. Astrophys. 1970. Vol. 7. P. 175–203.
58. *Chapront J., Simon J.L.* Variations séculaires au premier ordre des éléments des quatre grosses planètes. Comparaison avec Le Verrier et Galliot // Ibid. 1972. Vol. 19. P. 231–234.
59. *Chapront J., Bretagnon P., Mehl M.* Un formulaire pour le calcul des perturbations d’ordres élevés dans les problèmes planétaires // Celest. Mech. 1975. Vol. 11. P. 379–399.
60. *Cohen C. J., Hubbard E. C.* Libration of the close approaches of Pluto to Neptune // Astron. J. 1965. Vol. 70. P. 10–13.
61. *Cohen C. J., Hubbard E. C., Oesterwinter C.* Elements of the outer planets for one million years // Astron. Papers. Amer. Ephem. 1973. Vol. 22, pt. 1. 9. P. 3–82.
62. *Guzzo M.* The web of three-planet resonances in the outer Solar System // Icarus. 2005. Vol. 174. P. 273–284.
63. *Guzzo M.* The web of three-planet resonances in the outer Solar System. II. A source of orbital instability for Uranus and Neptune // Ibid. 2006. Vol. 181. P. 475–485.
64. *Hamid S. E.* First-order planetary theory // Smithsonian Astrophysical Observatory Special Report. 1968.
65. *Hayes W. B.* Chaos in the Outer Solar System may be indeterminate // Bull. of the American Astronomical Society. 2005. Vol. 37. P. 1414.
66. *Hayes W. B.* Surfing on the edge: chaos vs. near-integrability in the system of Jovian planets // Nature. (В печати).
67. *Ito T., Tanikawa K.* Very long-term numerical integrations of Solar System planetary orbits // Proc. the 8th IAU Asian-Pacific Regional Meeting. Vol. 2. Astron. Soc. Jap. 2002. P. 45–46.
68. *Ito T., Tanikawa K.* Long-term integrations and stability of planetary orbits in our Solar System // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2002. Vol. 336 P. 483–500.

69. *Jorba A., Zou M.* A software package for the numerical integration of ODEs by means of high-order Taylor methods // *Experimental Mathematics*. 2005. Vol. 14. P. 99–117.
70. *Kinoshita H., Nakai H.* Motions of the perihelios of Neptune and Pluto // *Celest. Mech.* 1984. Vol. 34. P. 203–217.
71. *Kinoshita H., Nakai H.* New methods for long-time numerical integration of planetary orbits // *Proc. of the IAU Symp.* № 152. *Chaos, Resonance, and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System* / Ed. S. Ferraz-Mello. Dordrecht: Kluwer, 1992. P. 395–406.
72. *Kinoshita H., Nakai H.* Long-term behavior of the motion of Pluto over 5.5 billion years // *Earth, Moon and Planets*. 1995. Vol. 71, № 3. P. 165–173.
73. *Kinoshita H., Nakai H.* The motion of Pluto over the age of the Solar System // *Proc. of the IAU Symp.* № 172. *Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System* / Eds. S. Ferraz-Mello, B. Morando, J. E. Arlot. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 61–70.
74. *Kholshevnikov K. V., Kuznetsov E. D.* Evolution of a two-planetary regular system on a cosmogonic time scale // *Journées-2003. Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds* / Eds. A. Finkelstein, N. Capitaine. SPb.: IAA RAS, 2004. P. 286–287.
75. *Kholshevnikov K. V., Kuznetsov E. D.* Behaviour of a weakly perturbed two-planetary system on a cosmogonic time-scale // *Order and chaos in stellar and planetary systems. ASP Conference Ser.* Vol. 316. / Eds. G. G. Byrd, K. V. Kholshevnikov, A. A. Mylläri, I. I. Nikiforov, V. V. Orlov. San Francisco: ASP, 2004. P. 99–105.
76. *Kholshevnikov K. V., Kuznetsov E. D.* Behaviour of a two-planetary system on a cosmogonic time-scale // *Proc. of the IAU Coll.* № 197. *Dynamics of Populations of Planetary Systems* / Eds. Z. Knežević, A. Milani. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 107–112.
77. *Laskar J.* Progress in general planetary theory // *Celest. Mech.* 1984. Vol. 34. P. 219–221.
78. *Laskar J.* Accurate methods in general planetary theory // *Astron. Astrophys.* 1985. Vol. 144. P. 133–146.

79. *Laskar J.* Secular terms of classical planetary theory using the results of general theory // *Ibid.* 1986. Vol. 157. P. 59–70.
80. *Laskar J.* Secular evolution of the Solar System over 10 million years // *Ibid.* 1988. Vol. 198. P. 341–362.
81. *Laskar J.* A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System // *Nature.* 1989. Vol. 338. P. 237–238.
82. *Laskar J.* The chaotic motion of the Solar System. A numerical estimate of the size of the chaotic zones // *Icarus.* 1990. Vol. 88. P. 266–291.
83. *Laskar J.* A few points on the stability of the Solar System // *Proc. of the IAU Symp. № 152. Chaos, Resonance, and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System / Ed. S. Ferraz-Mello.* Dordrecht: Kluwer, 1992. P. 1–16.
84. *Laskar J.* Frequency analysis of dynamical system // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 1993. Vol. 56. P. 191–196.
85. *Laskar J.* Large scale chaos in the Solar System // *Astron. Astrophys.* 1994. Vol. 287. P. L9–L12.
86. *Laskar J.* Large scale chaos and marginal stability in the Solar System // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 1996. Vol. 64. P. 115–162.
87. *Laskar J.* Marginal stability and chaos in the Solar System // *Proc of the IAU Symp. № 172. Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System / Eds. S. Ferraz-Mello, B. Morando, J. E. Arlot.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 75–88.
88. *Laskar J., Robutel P.* Stability of the planetary three-body problem. I. Expansion of the planetary Hamiltonian // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 1995. Vol. 62. P. 193–217.
89. *Laskar J., Robutel P.* High order symplectic integrators for perturbed Hamiltonian systems // *Ibid.* 2001. Vol. 80. P. 39–62.
90. *Lecar M., Franklin F. A., Holman M. J.* Chaos in the Solar System // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 39. P. 581–631.
91. *Lestrade J.-F., Bretagnon P.* Perturbations relativistes pour l'ensemble des planètes // *Astron. Astrophys.* 1982. Vol. 105. P. 42–52.
92. *Lissauer J. J.* Chaotic motion in the Solar System // *Reviews of modern physics.* 1999. Vol. 71, № 3. P. 835–845.

93. *Locatelli U., Giorgilli A.* Invariant tori in the secular motions of the three-body planetary systems // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2000. Vol. 78. P. 47–74.
94. *Milani A., Nobili A. M., Fox K. et al.* // *Nature*. 1986. Vol. 319. P. 386–388.
95. *Milani A., Nobili A. M., Carpino M.* Secular variations of the semimajor axes: theory and experiments // *Astron. Astrophys.* 1987. Vol. 172. P. 265–279.
96. *Milani A., Nobili A. M.* Intergration error over very long time spans // *Celest. Mech.* 1988. Vol. 43. P. 1–34.
97. *Moisson X., Bretagnon P.* Analytical planetary solution VSOP2000 // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2000. Vol. 80. P. 205–213.
98. *Murray N., Holman M.* The origin of chaos in the outer Solar System // *Science*. 1999. Vol. 283. P. 1877–1881.
99. *Newhall X. X., Standish E. M., Williams J. G.* DE102: a numerical integrated ephemerides of the Moon and planets spanning forty-four centuries // *Astron. Astrophys.* 1983. Vol. 125. P. 150–167.
100. *Newman W. I., Varadi F., Lee A. Y. et al.* Numerical integration, Lyapunov exponents and the outer Solar System // *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2000. Vol. 32. P. 859.
101. *Newman W. I., Lee A. Y.* Symplectic integration methods and chaos: timestep selection and Lyapunov time // *Ibid.* 2005. Vol. 37. P. 531.
102. *Nobili A.M., Milani A., Carpino M.* Fundamental frequencies and small divisors in the orbits of the outer planets // *Astron. Astrophys.* 1989. Vol. 210. P. 313–336.
103. *Pitjeva E. V.* Numerical ephemerides of planets and the Moon — EPM and improvement of some astronomical constants // *Journées-2003. Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds* / Eds. A. Finkelstein, N. Capitaine. SPb.: IAA RAS, 2004. P. 243–250.
104. *Pitjeva E. V.* Precise determination of the motion of planets and some astronomical constants from modern observations // *Proc. of the IAU Coll. № 196. Transits of Venus: New Views of the Solar System and Galaxy* / Ed. D. W. Kurtz. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. P. 230–241.

105. *Quinn T. R., Tremaine S., Duncan M.* A three million year integration of the Earth's orbit // *Astron. J.* 1991. Vol. 101. P. 2287–2305.
106. *Richardson D. L., Walker C. F.* Numerical simulation of the nine-body planetary system spanning two million years // *J. Astronautical Science.* 1989. Vol. 37. P. 159–182.
107. *Robutel P.* An application of KAM theory to the planetary three body problem // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 1993. Vol. 56. P. 197–199.
108. *Robutel P.* The stability of the planetary three-body problem: influence of the secular resonances // *Ibid.* 1993. Vol. 57. P. 97–98.
109. *Robutel P.* Stability of the planetary three-body problem. II. KAM theory and existence of quasiperiodic motions // *Ibid.* 1995. Vol. 62. P. 219–261.
110. *Roy A. E., Walker I. W., MacDonald A. J. et al.* Project LONGSTOP // *Vistas in Astronomy.* 1988. Vol. 32, pt. 2. P. 95–116.
111. *Simon J. L.* Théorie du mouvement des quatre grosses planètes. Solution TOP82 // *Astron. Astrophys.* 1983. Vol. 120. P. 197–202.
112. *Simon J. L., Chapront J.* Perturbations du second ordre des planètes Jupiter et Saturne. Comparaison avec Le Verrier // *Ibid.* 1974. Vol. 32. P. 51–64.
113. *Simon J. L., Bretagnon P.* Perturbations du deuxième ordre des quatre grosses planètes. Variations séculaires du demi-grand axe // *Ibid.* 1978. Vol. 69. P. 369–372.
114. *Simon J.L., Bretagnon P.* Résultats des perturbations du deuxième ordre des quatre grosses planètes // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1978. Vol. 34. P. 183–194.
115. *Simon J. L., Francou G.* Théorie au troisième ordre des masses des quatre grosses planètes // *Astron. Astrophys.* 1981. Vol. 103. P. 223–243.
116. *Simon J. L., Francou G.* Amélioration des théories de Jupiter et Saturne par analyse harmonique // *Ibid.* 1982. Vol. 114. P. 125–130.
117. *Simon J. L., Bretagnon P.* Théorie du mouvement de Jupiter et Saturne sur un intervalle de temps de 6000 ans. Solution JASON84 // *Astron. Astrophys.* 1984. Vol. 138. P. 169–178.

118. *Simon J. L., Joutel F., Bretagnon P.* Calcul de perturbations mutuelles des quatre grosses planètes en fonction d'une seule variable angulaire // *Ibid.* 1992. Vol. 265. P. 308–323.
119. *Standish E. M. Jr.* The JPL planetary ephemerides // *Celest. Mech.* 1982. Vol. 26. P. 181–186.
120. *Standish E. M.* JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405. Interoffice Memorandum. 312. F-98-048. JPL. 1998.
121. *Standish E. M., Newhall X. X., Williams J. G., Folkner W. M.* JPL planetary and lunar ephemerides, DE403/LE403. Interoffice Memorandum. 314.10-127. JPL. 1995. 22 p.
122. *Standish E. M., Newhall X. X.* New accuracy levels for Solar System ephemerides // *Proc. of the IAU Symp. № 172. Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System* / Eds. S. Ferraz-Mello, B. Morando, J. E. Arlot. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 29–36.
123. *Sussman G. J., Wisdom J.* Numerical evidence that the motion of Pluto is chaotic // *Science*. 1988. Vol. 241. P. 433–437.
124. *Sussman G. J., Wisdom J.* Chaotic evolution of the Solar System // *Science*. 1992. Vol. 257. P. 56–62.
125. *Varadi F., Ghil M., Kaula W. M.* Jupiter, Saturn, and edge of chaos // *Icarus*. 1998. Vol. 139. P. 286–294.
126. *Varadi F., Runnegar B., Ghil M.* Successive refinements in long-term integrations of planetary orbits // *Astrophys. J.* 2003. Vol. 592. P. 620–630.
127. *Wisdom J.* Long-term evolution of the Solar System // *Proc. of the IAU Symp. № 152. Chaos, Resonance, and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System* / Ed. S. Ferraz-Mello. Dordrecht: Kluwer, 1992. P. 17–24.
128. *Wisdom J., Holman M.* Symplectic maps for the N -body problem // *Astron. J.* 1991. Vol. 102. P. 1528–1538.

ГАЛАКТИКИ И МЕЖГАЛАКТИЧЕСКАЯ СРЕДА: МЕХАНИЗМЫ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

Введение

Астрономов в шутку, а иногда и просто потому, что не понимают, чем же действительно занимаются представители этой древнейшей научной профессии, называют звездочетами. Как ни странно, доля истины в этой шутке все еще сохранилась. Известная исстари технология звездных подсчетов с успехом применяется и в эпоху больших телескопов. Например, этот метод оказался важным средством при изучении структуры глобул — изолированных сгустков газа и пыли. Как мы знаем, из подобных объектов в глубине молекулярных облаков образуются звезды. Поглощение в глобулах в оптическом участке спектра чудовищно велико, но современные матричные приемники для ближнего ИК позволяют изучить «на просвет» недра таких очень темных облаков вплоть до $A_v = 40$! Из подсчета звезд, наблюдаемых перед облаком и за ним, делаются весьма точные выводы о структуре глобулы, точнее о распределении плотности (пыли) в глобуле [1].

Примерно до середины 60-х гг. прошлого века исследования, основанные на свойствах изучения распределений (главным образом пространственных и кинематических) звезд, были опорными и для построения теорий эволюции Галактики. С другой стороны, методы, основанные на анализе свойств распределений в выборках галактик и других внегалактических объектов, обеспечили определенный прогресс в понимании эволюции ансамбля галактик. Однако эти наблюдательные и основанные на них теоретические данные были существенно неполными. Решение принципиально комплексных проблем, таких как эволюция самих галактик, было невозможно. Так, выводы, основанные, например, на эволюционной трактовке Хаббловской последовательности, сейчас кажутся весьма наивными. Серьезные сдвиги произошли, когда прояснилась картина эволюции звезд.

К началу 1970-х гг. прошлого века окончательно сложились основы теории физического строения и эволюции звезд (см. хороший обзор в книге [2]). Поскольку звезды и межзвездная среда — основные составляющие галактик, углубление знаний о звездах стало предпосылкой к более глубокому и комплексному изучению этих гигантских звездных систем. Появились модели, описывающие не только динамическую эволюцию галактик, но и химические свойства и химическую эволюцию, изменение наблюдаемой структуры галактик в различных участках спектра и т. д. Появился комплексный подход, позволивший строить астрофизически полные, а значит и перспективные, модели. С другой стороны, большой прогресс в космологии обеспечил более глубокое понимание начальных условий образования галактик. Стало возможным проведение сквозного моделирования эволюции галактик, начиная от их образования и кончая эпохой, когда галактика перестает быть галактикой. Все это объясняет, почему начиная с 1980-х гг. исследования эволюции галактик безоговорочно вышли на первый план в астрофизических исследованиях.

В лекции [3] рассказано о том, как моделируется эволюция галактик. Целью такого моделирования является воспроизведение изменений их важнейших глобальных параметров — массы газа, химического состава, скорости звездообразования, светимости (болометрической или в определенной фотометрической полосе), темпа вспышек сверхновых и др. В полной модели должны быть учтены многие факторы: звезды, газ и пыль в межзвездном пространстве, крупномасштабные галактические структуры, а также весьма разнообразные процессы: образование и эволюция звезд, потеря ими массы и обогащение межзвездного вещества химическими элементами — продуктами звездной эволюции, фазовые переходы в межзвездной среде (МЗС), тепловые и ионизационные процессы, перенос излучения в МЗС, динамические процессы, определяющие эволюцию структуры Галактики и т. д. Можно сказать, что модели галактической эволюции аккумулируют все основные знания, накопленные в астрофизике. Главной задачей теоретиков-моделистов является построение модели, которая могла бы объяснить весь объем наблюдений о галактическом прошлом и настоящем.

Изучая эволюцию звезд и галактик легко увидеть некоторую аналогию между схемами эволюции звезд/звездных скоплений и галактик. Звезды образуются из межзвездного газа и пыли, в процессе эволюции различными путями воздействуют на окружающую межзвездную среду: через звездный ветер, ионизирующее/диссоциирующее

излучение, лучистое давление, магнитные и другие механизмы воздействия. На поздних стадиях звездной эволюции они могут обогащать межзвездную среду (МЗС) тяжелыми элементами — продуктами ядерных реакций, протекающих в звездах. Галактики также образуются из исходной газовой, но уже межгалактической среды (МГС), нагревают ее (ионизируют), выбрасывают в межгалактическую среду обогащенное тяжелыми химическими элементами вещество. Однако есть и существенные отличия. Прежде всего, хотя большая часть составляющих МЗС и МГС одинаковы (это вещество: газ и пыль, космические лучи и поля: излучения, магнитное, гравитационное), в МГС в гораздо больших масштабах присутствует так называемое темное вещество (см. лекцию [4]). Само формирование галактик происходит под гравитационным «контролем» сгустка темного вещества, а при образовании звезд темное вещество не играет роли. Еще одно существенное отличие состоит в том, что собственно на звезду, после того как она сформировалась, МЗС оказывает лишь очень малое воздействие. Роль аккреции вещества в звездах, за исключением тесных двойных звезд, несущественна, а в эволюции галактик это весьма важный фактор, ибо за время жизни галактики аккрецированная масса может составлять существенную долю массы самой галактики. Отличается и режим обогащения тяжелыми элементами соответственно МЗС и МГС. Галактика может потерять значительную долю производимых ее звездами тяжелых элементов в процессе обычной (спокойной) эволюции. Причем делают это все галактики за исключением, может быть, только самых массивных. В случае МЗС как раз наоборот — основной вклад в обогащение МЗС вносят массивные звезды, причем взрывным образом. Можно перечислять и другие отличия: существенно различные временные шкалы ряда процессов, важную роль столкновений (сближений) в жизни галактик, но пренебрежимую в жизни звезд и т. д. В общем, свойства галактики и их изменения в процессе эволюции гораздо более тесно связаны с МГС, чем параметры уже сформировавшейся звезды с окружающей ее МЗС.

В этой лекции рассматриваются современные представления об МГС и механизмы эволюционных взаимосвязей галактик и межгалактической среды. Поскольку все аспекты сколь-нибудь глубоко рассмотреть в объеме краткой лекции невозможно, основное внимание будет уделено направлениям, в которых работал и работает автор — механизмам обмена веществом между галактиками и МГС.

Из чего состоит МГС

При изучении МЗС и звезд (за исключением самых первых звезд) нет необходимости использовать космологические представления. Слишком уж различны пространственные шкалы МЗС и Вселенной. В случае же МГС привлечение космологических моделей неизбежно. До начала образования галактик и звезд (на $z \sim 20$, где z — космологический фактор) МГС представляла собой Вселенную, да и сейчас большая доля вещества Вселенной содержится именно в МГС. Вклад различных компонентов Вселенной обычно описывается на языке плотности вещества-энергии «омега». Общая плотность Вселенной $\Omega = \rho/\rho_{\text{crit}}$, где $\rho_{\text{crit}} = 3H_0/8\pi G = h^2 \times 1.88 \times 10^{-29} \text{ г/см}^3$ — критическая плотность, а константа Хаббла H_0 представлена в виде $H_0 = h \times 100 / M^{-1}$ (для постоянной Хаббла можно считать общепринятой оценкой $h = 0.72 \pm 0.05$). Согласно современным данным $\Omega = 1.02 \pm 0.02$, ее основными составляющими являются $\Omega_\Lambda = 0.70 \pm 0.03$ — плотность так называемой темной энергии, $\Omega_m = 0.27 \pm 0.07$ — плотность небарионного темного вещества (dark matter) и $\Omega_B = 0.044 \pm 0.01$ — плотность барионного вещества.

Поскольку часть барионов сконцентрировалась в галактики, оценка 4 % для Ω_B является верхней при определении плотности межгалактического вещества. Важно отметить, что это теоретическая оценка. Наблюдается лишь некоторая доля барионов во Вселенной. В лекции [4] подробно обсуждена природа пока еще скрытого от наблюдений барионного вещества (dark baryonic matter) и приведены оценки наблюдаемой доли барионного вещества (до 30 %). Интенсивный поиск барионов продолжается, и доля наблюдаемого барионного вещества растет. Последние оценки делаются иногда с вызывающей улыбку точностью. Так в работе [5] сообщается, что «54 % ... of the expected number of baryons in the local Universe have eluded detection until very recently...». Важной здесь является ссылка на местную Вселенную. Дело в том, что изменения относительно вклада различных фаз барионного вещества меняется в процессе эволюции Вселенной. Таких фаз четыре.

Конденсированная фаза — звезды и холодный газ в галактиках. Это хорошо обнаруживаемая фаза.

Горячая фаза — газ в скоплениях галактик. Наблюдается по рентгеновскому излучению $T > 10^7 \text{ К}$.

Диффузная фаза — большинство структур, наблюдающихся в L_α -линиях поглощения в спектрах далеких квазаров.

Тепло-горячая (warm-hot) фаза — газ, нагретый ударными процессами до температур $10^5 \leq T \leq 10^7$ К. Для обозначения этой фазы в англоязычной научной литературе, а значит практически во всем мире, принят термин WHIM — Warm-Hot Intergalactic Matter.

Пункты 2–4 и представляют собой вещество МГС. В лекции [4] приведены теоретические оценки изменения относительной доли этих компонентов в ходе эволюции Вселенной. Согласно этим оценкам наибольшая доля темного барионного вещества в локальной Вселенной присутствует и может быть обнаружена именно в фазах 3 и 4.

Относительные вклады галактик и горячего газа в скоплениях галактик (эта фаза столь специфична, что используется отдельный термин IntarCluster Medium — ICM) максимальны в нашу эпоху, но не превышает 10 % от общей плотности барионов каждый. В ранней Вселенной при $z > 2$ наибольшая доля барионного вещества находится в диффузной фазе. При таких z диффузное вещество наблюдается с помощью наземных телескопов как L_α -лес в оптических спектрах далеких источников энергичного излучения (обычно квазаров). Сдвиг линий на фактор $(1+z)$ приводит к тому, что линии L_α водорода от удаленных объектов лежат в оптическом и даже в ближнем ИК-участках спектра. С помощью больших наземных инструментов такие спектры могут быть исследованы с целью получения количественных выводов и об относительном содержании барионов, и о характере распределения барионного вещества.

Оказалось, что как ненаблюдаемое темное вещество (это следует из численных расчетов космологических моделей), так и наблюдаемое барионное вещество структурированы в виде так называемой «космической паутины» (cosmic web). Космологические модели позволяют проследить эволюцию этой трехмерной паутины. В пустотах (voids) плотность барионов крайне низка, на несколько порядков ниже, чем в нитях или стенках (filaments) космической паутины. Концентрация частиц газа в нитях/стенках паутины оценивается как $10^{-6}–10^{-4} \text{ см}^{-3}$. В ранней Вселенной она гораздо более мелкаячешая и скорее напоминает знаменитый оренбургский платок, но по мере космологического расширения становится все более разреженной, крупноячеистой и действительно более похожей на паутину, т. е. размеры ячеек растут, но толщина нитей (стенок) при этом не увеличивается. Это объясняется тем, что толщина нитей в значительной степени определяется самогравитацией, действие которой на локальной шкале (< 1 Мпк при $z = 0$) существенно превосходит остаточ-

ную «память» о динамике расширения, заданного в момент Большого Взрыва. Другими словами, локальное Хаббловское расширение в нашу эпоху на масштабах, меньших ~ 1 Мпк (характерных размерах Местной группы галактик) можно не учитывать. В более ранние эпохи этот масштаб был более соизмерим с размером галактики и Хаббловское расширение было важным фактором галактической эволюции. Таким образом, когда говорят о свойствах паутины, нужно обязательно указывать, на какой момент эволюции Вселенной проводится рассмотрение.

Существует весьма важное для понимания свойств и эволюции МГС несоответствие: наблюдения МГС дальней Вселенной ($z > 2$) дают оценку наблюдаемой Ω_B , близкую к теоретической (т. е. 0.04), а вот в ближней Вселенной ($z < \sim 2$) наблюдается гораздо меньше барионов, чем предсказывает теория. Собственно поиск барионов, обсуждавшийся выше в этом разделе, актуален именно в масштабах ближней Вселенной. Причины этого кажущегося недостатка барионов состоят в следующем.

Во-первых, большая часть барионов в ближней Вселенной находится в ненаблюдаемой с помощью наземных телескопов теплогорячей фазе. Даже при наблюдениях с УФ-телескопами WHIM труднообнаружима в L_α -линиях вследствие высокой степени ионизации и малой интенсивности излучения из-за низкой плотности, хотя некоторые системы с широкими L_α -линиями, возможно, относятся к WHIM ближней Вселенной ([6]).

Вторая причина имеет более фундаментальный характер. Увеличивающаяся разреженность космической паутины при уменьшении z приводит к тому, что на луче зрения оказывается меньшее количество нитей/стенок и узлов паутины. Статистика недостаточна для оценки полной плотности барионного компонента МГС.

Обсудим пути разрешения этой несколько парадоксальной проблемы. Наиболее подходящая методика для наблюдения WHIM — анализ линий поглощения высокоионизованных тяжелых элементов, особенно линий O VI, O VII и O VIII. Для этого нужны достаточно большие космические телескопы, позволяющие получать качественные спектры в мягком рентеновских и дальнем ультрафиолетовом участках спектра. В принципе с развитием внеатмосферной астрономии такие телескопы появляются. Об одном из таких проектов —

«Всемирной космической обсерватории — Ультрафиолет» (еще одно название — «Спектр-УФ») см. лекцию [7]. В последнее время публикуется много интересных данных наблюдений WHIM с помощью рентгеновского спектрографа на борту обсерватории Chandra.

Что касается второй причины, то для улучшения ситуации необходимо проведение наблюдений возможно большего количества далеких энергичных источников, более-менее равномерно распределенных по небесной сфере (чтобы не пропустить какую-либо нить/стенку). Для этого проникающая сила телескопов должна быть достаточно высокой, а организация проекта должна позволять проведение обширной программы получения качественных спектров большого числа источников. Существующие проекты таким требованиям не удовлетворяют. Тем не менее уже полученные с их помощью данные вызывают большой интерес и оживленные дискуссии.

В работе [8] при обсуждении перспектив поиска барионов в межгалактической среде и в окрестностях Галактики отмечено, что наблюдения с помощью даже относительно небольшого космического телескопа FUSE привели к удивительному результату, противоречащему сложившимся представлениям. При оценке массы большого числа поглощающих OVI облаков, наблюдавшихся с помощью космического аппарата, было получено, что полная масса барионов в этих облаках при относительном содержании кислорода 0.1 от солнечного оценивается в $10^{12} M_{Sun}$. Этого достаточно, чтобы объяснить значительную долю скрытой массы в гало нашей Галактики! Столь сильное заявление пока не подтверждено, но, несомненно, поиск барионов в окрестности Галактики продолжится. Здесь принципиально важно выявить, как соотносятся компоненты, наблюдаемые в УФ и в рентгене, какие из них имеют галактическое происхождение, а какие возникают в местных структурах WHIM.

Согласно парадигме космической паутины в ее узлах происходило образование галактик (в крупных узлах — скоплений галактик), поэтому естествен также вопрос: можно ли пронаблюдать местный WHIM, связанный с нашей Галактикой? Ответы на все эти вопросы имеют принципиальное значение и для углубления представлений об образовании галактик, и для космологии в целом.

Механизмы взаимодействия МГС и галактик

Механизмы взаимодействия между МГС и галактиками можно разделить на две группы в соответствии с «направлением воздействия»: галактика—МГС и МГС—галактика. К первой группе относятся ионизация МГС излучением звезд и источниками в активных галактических ядрах, нагрев МГС (не только путем ионизации, но и через выбросы горячего газа из галактик — так называемой галактический ветер), поставка в МГС химически обогащенного вещества (тот же галактический ветер, выброс пыли). Ко второй группе относятся процессы выпадения вещества МГС на галактику (особенно важно влияние этого фактора на химическую эволюцию галактики), обдирание газового компонента галактики вследствие динамического давления газа МГС (этот фактор играет существенную роль в эволюции галактик в богатых скоплениях), динамическое трение (может играть роль в образовании гигантских cD галактик в центрах богатых скоплений). Я не буду рассматривать столкновения (близкие прохождения) галактик и остановлюсь в большей степени на механизмах, существенных для рассмотрения химической эволюции галактик и МГС.

Для понимания процессов химической эволюции Вселенной необходимо уметь определять химический состав МГС в различные космологические эпохи. До начала образования звезд во Вселенной сохраняется первичный химический состав (практически без тяжелых элементов). Когда появляются звезды, наступает эпоха сложного химического круговорота вещества, в частности обмен тяжелыми элементами между галактиками и МГС. Изначально такие элементы образуются в звездах и затем многими путями поступают в межзвездную и межгалактическую среду. Разработано много моделей химической эволюции на больших z . Согласно результатам ряда расчетов при $z = 3$ содержание тяжелых элементов в наиболее плотных облаках МГС может достигать значений в несколько сотых, тогда как в пустотах это содержание много меньше.

Галактический ветер

Галактики в процессе эволюции активно выбрасывают вещество в МГС. В литературе наиболее часто обсуждается выброс вещества из эллиптических галактик, галактик со вспышкой звездообразования и карликовых галактик. Эллиптические галактики вымели в МГС большую часть своего межзвездного вещества, не превратившего-

ся в звезды, во время мощной начальной вспышки звездообразования. Карликовые галактики весьма многочисленны. И хотя основная масса галактического вещества сосредоточена в галактиках массой, близкой к $10^{11} M_{Sun}$ (см. [9]), относительный вклад карликовых галактик в общем потоке вещества из галактик в МГС может быть значительным, поскольку глубина потенциальной ямы, создаваемой гравитационным полем такой галактики, невелика и нагретому веществу МЗС проще покинуть такую галактику.

Теоретические расчеты и наблюдения свидетельствуют, что дисковые галактики также активно выбрасывают вещество в межгалактическое пространство. На ранней стадии эволюции наша Галактика (так же как и другие дисковые галактики) испытала сильный подъем скорости звездообразования (вспышку). При этом поток массы выброшенного вещества был гораздо значительнее, чем в нашу эпоху. Механизм выброса хорошо изучен, в том числе и в работах группы в ИНАСАН. Следуя, например, нашей работе [10], опишем, как происходит выброс. Когда в ОВ-ассоциациях начинают взрываться сверхновые, вокруг ассоциации раздувается гигантский горячий газовый пузырь. Кинетическая энергия его оболочки, состоящей из более холодного и плотного газа, настолько велика, что эта оболочка преодолевает притяжение диска и вырывается в окологалактическое пространство. Там оболочка разрывается и открывает горячему газу из внутренней области пузыря путь в МГС. Горячий газ покидает галактический диск по каналу шириной от 100 до 1000 пк. Такой канал иногда называют «каминной трубой» (chimney). На большой высоте над галактическим диском потоки газа из отдельных пузырей сливаются, образуя мощный галактический ветер (рис. 1). Некоторая (небольшая) часть фрагментов оболочки также может покинуть Галактику. Вследствие галактического ветра наша современная Галактика теряет несколько десятых массы Солнца в год, в том числе несколько сотых массы Солнца в виде атомов тяжелых элементов (или как принято называть эти элементы в астрофизике — металлов).

Влияние галактического ветра, вызванного сверхновыми, на эволюцию как самой галактики, так и МГС зависит от того, как сильно высокоскоростное истечение взаимодействует с газом галактического диска и гало. Согласно нашим численным моделям такое взаимодействие незначительно. Это означает, что горячий ветер несет в МГС лишь небольшое количество вещества (слабо «нагружен массой»), но зато транспортирует большое количество энергии и тяже-

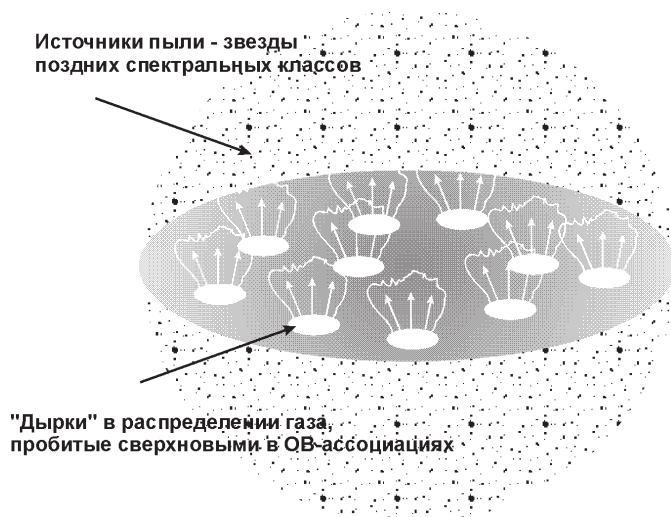


Рис. 1. Галактический ветер и вынос пыли из галактики

лых элементов. Однако в случае мощных вспышек звездообразования, происходящих в плотной области вокруг галактического центра, поток массы из области вспышки может быть значительным и наблюдаемым.

Наблюдений галактического ветра довольно много. Приведем в качестве примера наблюдения такого ветра на ранних стадиях галактической эволюции. В [9] обсуждаются результаты наблюдений разных авторов, в частности работа [11], в которой сообщается об обнаружении сильной асимметричной L_α -эмиссионной линии на $z = 5.190$ при наблюдениях с высоким спектральным разрешением объекта в одной из площадок Глубокого обзора Хаббла (Hubble Deep Field-North). Спектр был получен на телескопе Кек II с Эшельным спектрографом при экспозиции 2.25 ч. Профиль L_α -эмиссионной линии имеет резкий обрыв со стороны коротких длин волн и широкое крыло в красную сторону. Такие профили характерны для систем с мощным звездообразованием и объясняются деталями переноса излучения в расширяющейся оболочке. Профиль согласуется с моделью галактического истечения со скоростью $v > 300$ км/с.

Если галактический ветер покидает родительскую галактику и смешивается с МГС, то в наблюдениях МГС (таких как L_α -поглощающие системы) должны проявляться последствия таких мощных энергетических вспрысков. Пока что этот аспект мало изучен. Еще большую проблему представляет перемешивание вещества МГС. Наблюдения линий тяжелых элементов МГС, например в тех же L_α -поглощающих системах, показывают, что даже при отсутствии поблизости галактик содержание тяжелых элементов довольно значительно. Более того, наблюдения областей МГС низкой плотности показывают, что некоторое количество металлов и в этих считающихся пустыми зонах имеется. Роль галактического ветра в обогащении МГС тяжелыми элементами — предмет интенсивных исследований.

Выметание пыли

Еще один канал выброса тяжелых вещества из галактики в МГС — выброс пыли. Этот процесс не сказывается на полной массе галактики, но может существенно повлиять на ее химический состав. Мы обсудим этот механизм, опираясь в основном на результаты, полученные нами в [12].

Современные исследования доказывают, что пыль, которая состоит преимущественно из тяжелых элементов, является существенной составной частью межгалактического вещества. В частности, в спектрах излучения квазаров обнаружены межгалактические полосы поглощения, характерные также для межзвездной кривой экстинкции и объясняемые обычно присутствием в межзвездной среде графитовых пылинок. Имеются также доказательства наличия межгалактического покраснения излучения сейфертовских галактик. Имеются данные о нескольких облаках межгалактической пыли, полученные на основе непосредственных наблюдений инфракрасного излучения пылевых частиц. Вне пределов галактик условия, необходимые для образования пыли — низкая температура и высокая плотность газа, — не выполняются. Это заставляет предположить, что пыль, образующаяся в галактиках, посредством какого-то одного или нескольких механизмов выносится в межгалактическое пространство.

В качестве таких механизмов предлагалось выметание пыли из галактик в процессе их движения сквозь межгалактический газ (этот механизм может быть эффективным для галактик в богатых скоплениях), выметание пыли под воздействием галактического ветра,

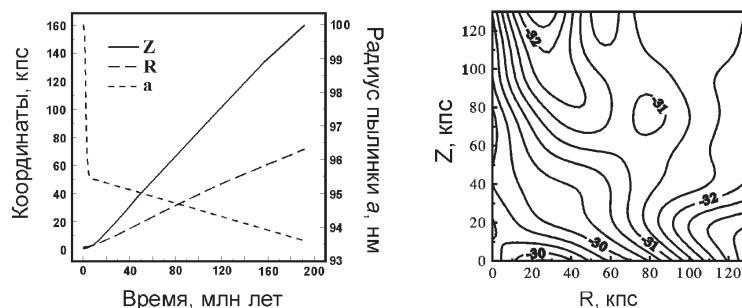
или лучистое давление на пыль. Процесс потери пыли из галактики вследствие лучистого давления пока не наблюдается, поскольку он протекает почти по всей поверхности галактического диска, следовательно, лучевая концентрация пылинок мала, независимо от того под каким углом наблюдается галактический диск. В этом отношении в среднем менее эффективный механизм выноса пыли при истечении галактического ветра представляет более благоприятные возможности для наблюдений.

Наблюдения, проведенные в последние годы, позволили исследовать выброс пыли из галактик в процессе образования «каминных труб». Например, авторы работы [13] наблюдали истечение пыли из спокойных (без вспышки звездообразования) дисковых галактик. В полосе B были получены изображения 10 галактик с большим наклоном к лучу зрения. Для выделения деталей изображения, относящихся к пылевым структурам, применена технология нерезкой маски (unsharp-masking). У трех галактик получены многочисленные изображения структур типа «каминной трубы», простирающихся на расстояние до 2 кпк от плоскости галактики. Оценка массы пыли в таких структурах дает $\sim 1\%$ от общей массы пыли в галактике.

Исследования оптической экстинкции дают оценку лишь нижнего предела количества пыли. Более точно можно определить эту величину из наблюдений (оптически тонкого) теплового излучения на субмиллиметрах. С помощью крупных инструментов показано, что подобные пылевые истечения имеют место по крайней мере у половины дисковых галактик и количество пыли вне галактической плоскости достигает 5 % общего количества пыли в галактике. Естественно, что в галактиках со вспышками звездообразования также обнаруживаются выбросы пылевого вещества. Здесь наблюдения в субмиллиметровом участке спектра особенно эффективны. В [14] по изображениям близких галактик со вспышками звездообразования NGC 253, NGC 4631 и M82, полученным на длинах волн от 450 до 850 мкм с камерой SCUBA, показано, что у всех трех галактик наблюдается выброс пыли вдоль малой оси на расстояние до 1.2 кпк. Масса пылевого выброса в случае M82 составляет до 10^6 – $10^7 M_{Sun}$. Дальнейшая судьба этой пыли не вполне определена. Возможно, что некоторая ее часть покидает галактику и смешивается с МГС.

Идея выметания пыли из галактических дисков обсуждалась еще в 70-е гг. прошлого века, но численные модели, позволяющие учесть многие факторы, появились только в 90-е. Нами выполнено остаю-

шееся до сих пор одним из наиболее полных исследований. Детально рассмотрена динамика силикатных и графитовых частиц с радиусами $(0.1 - 2) \times 10^{-5}$ см в окрестностях Млечного Пути. При интегрировании уравнения движения пылинок учитывались гравитационное притяжение, давление излучения, торможение окружающим газом и разрушение пылинки. Оказалось, что пылинки, образовавшиеся во внешних слоях красных гигантов, покидают окрестности этих звезд, а затем не только выживают в горячей (и разреженной) галактической короне, но и, несколько уменьшившись в размерах, уходят от галактического диска на большие расстояния (многие десятки килопарсек) за время ~ 100 млн лет. Темп выметания пыли из Галактики давлением излучения звезд составляет до $0.04 M_{Sun}/\text{год}$. Учет магнитного поля, которое может препятствовать движению заряженных пылинок, не вполне ясен и зависит от реальной геометрии поля. В наименее благоприятном для выноса пыли случае темп выметания может быть $0.01 M_{Sun}/\text{год}$. Построено стационарное распределение плотности пылинок в окрестности Галактики (рис. 2).



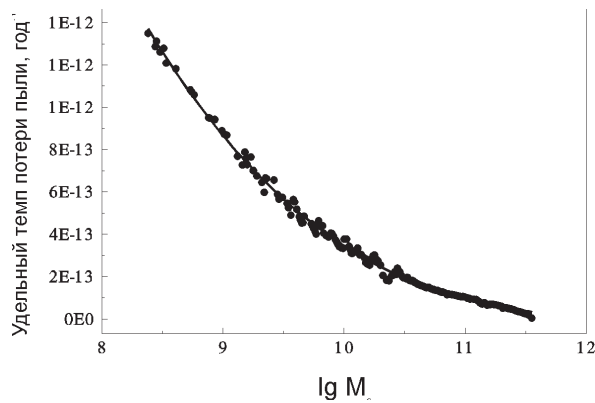


Рис. 3. Зависимость темпа потери пыли из галактики от массы галактики

тогда как у самых массивных галактик $10^{12} M_{Sun}$ потери становятся несущественными.

Обдирание динамическим давлением

Доля газового компонента ИСМ в богатом скоплении может в несколько раз превышать массу галактик, входящих в это скопление. Взаимодействие галактик — членов скопления с этим веществом в значительной степени определяет их свойства и эволюцию. С начала 1970-х, когда была предложена идея «обдирания» газового компонента галактик динамическим давлением, возникающим при движении галактики в плотной газовой среде (ИСМ), этот механизм (ram pressure stripping) привлекался для объяснения различных свойств галактик в скоплениях, таких, как недостаток нейтрального водорода в спиральных галактиках, слабая звездообразовательная активность в них и т. д. (см. более подробное обсуждение в [9]). Наиболее информативными для теоретического изучения процесса являются численные модели. Хорошим примером является работа [15]. В ней для изучения роли динамического давления в скоплении Virgo использован метод моделирования системы N-тел. Для представления газового компонента дисковой галактики, движущейся в ИСМ, использован ансамбль из 10 000 облаков газа, которые могут испытывать неупругие столкновения. Динамическое давление моделируется как дополнительное ускорение облаков, расположенных на поверх-

ности ансамбля со стороны набегающего газа ICM. Варьировались параметры орбиты, ориентация диска, но распределение газа внутри скопления бралось таким, как это было определено по наблюдениям. Как и следовало ожидать, процесс обдираания довольно сложен и сопровождается временными повышениями плотности, выносом газа из галактики и последующим возвращением части (довольно значительной — до нескольких сотен миллионов солнечных масс) газа в галактику. Не останавливаясь на интересных деталях взаимодействия газового компонента галактики с ICM, отмечу основной результат — подтверждено предположение о том, что именно обдираание динамическим давлением ответственно за наблюдаемый дефицит нейтрального водорода в дисковых галактиках скопления Virgo.

Акреция

Акреция вещества на галактику — важнейший элемент ее взаимодействия с МГС. Собственно, и формирование самой галактики можно рассматривать как процесс, определяемый аккрецией. Оорт в 1970 г. впервые опубликовал идею о возможности аккреции вещества на дисковые галактики. Он предположил, что падение на галактику внегалактического облака нейтрального газа с очень высокой скоростью ($|V_{HVC}| > 140$ км/с) может породить появление других (высокоскоростных) облаков в диапазоне скорости ($80 < |V_{HVC}| < 140$ км/с) и оценил темп выпадения облаков $\sim 1M_{Sun}/\text{год}$. С тех пор получено много наблюдательных свидетельств выпадения HI облаков на галактики. В [16] проведен обзор нейтрального водорода на 21 см и показано, что 99 % облаков с очень высокими скоростями, наблюдаемых в направлении галактического антицентра, и 84 % высокоскоростных облаков во внутренних областях Галактики имеют отрицательные скорости (т. е. приближаются к галактическому диску). Оцененный темп аккреции составляет $0.2 - 0.5M_{Sun}/\text{год}$. Вообще говоря, на галактический диск выпадают и другие облака с меньшими скоростями, в частности с промежуточными ($|V_{IVC}| \sim 80$ км/с), но они скорее всего вторичного происхождения. Этот вывод подтверждает и хорошо известная корреляция: самые высокоскоростные облака имеют наименьшую металличность (не более 0.1 от солнечной), и, наоборот, самую высокую металличность (> 0.25) имеют IVC.

Реионизация водорода и гелия

Согласно принятым космологическим представлениям после эпохи рекомбинации ($z \sim 1000$) МГС была заполнена нейтральными водородом и гелием с малой примесью дейтерия, лития и др. Первые сколлапсировавшие объекты — звезды населения III и протогалактики — могли сформироваться на $z \sim 20$, до этого времени во Вселенной не было источников излучения (присутствовало только фоновое космологическое излучение); кроме того, Вселенная была непрозрачна в УФ и оптическом диапазоне из-за сильного поглощения водородом и гелием МГС. Эту эпоху называют темной (dark ages). Появление первых звезд и галактик создало локальные источники квантов, которые ионизовали и нагревали МГС. МГС становилась в этих локальных зонах более горячей и прозрачной. Этот процесс развивался, пока большое число вновь образовавшихся источников не ионизовало практически весь объем МГС, за исключением самых плотных участков (нитей/стенок паутины). Окончание «темной эпохи» в эволюции Вселенной определяется моментом, когда весь водород и гелий МГС были вновь ионизованы (отсюда — реионизация) излучением первых звезд и квазаров. До последнего времени считалось, что это происходило при $z > 5$ для H I, но He остается не реионизованным вплоть до $z \simeq 3$. В отношении гелия эти представления так и сохранились, хотя в отношении H I оценки эпохи реионизации, возможно, сдвинулись к $z > 7$.

На рис. 4 показан спектр квазара Q0302-003, полученный с помощью спектрографа STIS [17]. Хорошо виден завал спектра на длинах волн короче 130 нм, обусловленный поглощением He II. Это характерный пример действия эффекта Ганна—Петерсона. Для иллюстрации показан также L_α -лес H I в спектре этого же квазара, полученный на телескопе Кека. Значение длин волн для этого спектра нужно умножить на 4.

Усилия ряда исследователей сейчас направлены на изучение деталей процесса (этапа) реионизации Вселенной, поскольку этот этап жизни Вселенной является ключевым для развития как космологических, так и астрофизических теорий, в частности для понимания химической эволюции галактик и МГС. Металличность МГС определяется обычно из УФ-спектроскопии резонансных линий C IV $\lambda 1549$, Si IV $\lambda 1400$, Si III $\lambda 977$, Si III $\lambda 1206$ и O VI $\lambda 1035$. Эти резонансные линии — наиболее чувствительный индикатор металличности. Скачки, например, в C IV/Si IV на $z = 3$ означают, что резко меняются

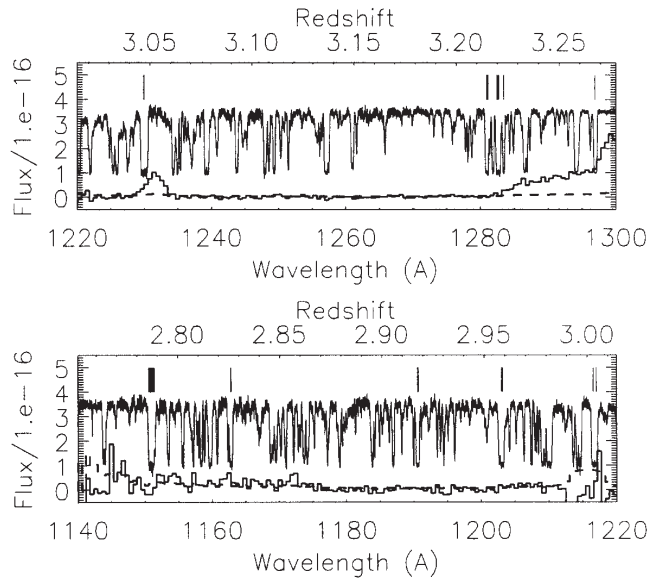


Рис. 4. Эффект Ганна—Петерсона, вызванный поглощением ионами НII и линии Ly_{α} -леса в спектре квазара Q0302-003. Длины волн линий Ly_{α} -леса нужно умножать на 4

условия ионизации и возбуждения, что связано с изменением в распределении спектра излучения вследствие ионизации He.

Заключение

Построение полной и согласованной картины эволюции Вселенной — задача весьма амбициозная, но в конечном итоге это и есть важнейшая цель познания окружающего нас мегамира. Для выполнения этой задачи нужно знать очень многое, в частности, хорошо представлять, как взаимодействуют между собой основные компоненты Вселенной. В этой лекции кратко описаны основные механизмы взаимодействия межгалактической среды и галактик. Это очень интересное направление исследований, в котором так много сделано, но гораздо больше еще нужно понять.

Работа поддержана грантом Президента РФ «Ведущая школа НШ-4820.2006.203-02-16433».

Список литературы

1. *Lada C. J., Alvez J. F., Lombardi M.* Near-infrared extinction and molecular cloud structure // *Protostars and Planets V* / Eds. B. Reipurh, D. Jewitt, K. Keil. University of Arizona Press, Tucson, 2006. P. 1.
2. *Масевич А. Г., Тутуков А. В.* // *Эволюция звезд: теория и наблюдения*, М.: Наука, 1988.
3. *Шустов Б. М., Вубе Д. З.* Модель галактической эволюции // *Физика космоса: Тр. конф. Екатеринбург, 2000*. С. 71.
4. *Шустов Б. М.* Скрытая масса во Вселенной и в Галактике // *Физика космоса: Тр. конф. Екатеринбург, 2005*. С. 207.
5. *Nicastro F., Mathur S., Elvis M., et al.* Missing baryons: the Local Group and Beyond // *IAU XXXIth General Assembly Abstract Book*. 2006. P. 296.
6. *Williams R. J., Mathur S., Nicastro F., et al.* CHANDRA AND Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer observations of warm-hot gas toward PKS 2155–304 // *eprint arXiv: astro-ph/0611583*.
7. *Шустов Б. М.* Всемирная космическая обсерватория — вариант выхода из кризиса исследований по внеатмосферной астрономии в России // *Физика космоса: Тр. конф. Екатеринбург, 2003*. С. 188.
8. *Шустов Б. М.* Ультрафиолетовая астрономия. Цель изучения — межзвездная и межгалактическая среда // *Физика космоса: Тр. конф. Екатеринбург, 2001*. С. 154.
9. *Shustov B.* Galaxies and the intergalactic medium: evolutionary interrelations // *Odessa Astron. Publ.* / Ed. N. Komarov. 2002. Vol. 15. P. 97.
10. *Igumenshchev I. V., Shustov B. M., Tutukov A. V.* Dynamics of supershells: blow-out // *Astron. Astrophys.* 1990. Vol. 234. P. 346.
11. *Dawson S., Spinrad H., Stern D. et al.* // *Astrophys. J.* 2002. Vol. 570. P. 92.
12. *Шустов Б. М., Вубе Д. З.* Выметание пыли из галактики // *Астрон. журн.*, 1995. Т. 72. Вып. 5. С. 650.
13. *Alton P. B., Rand R. J., Xilouris E. M. et al.* Dust outflows from quiescent spiral disks // *Astron. Astrophys. Suppl.* 2000. Vol. 145. P. 83.

14. *Alton P. B., Davies J. I., Bianchi S.* Dust outflows from starburst galaxies // *Astron. Astrophys.* 1999. Vol. 343. P. 51.
15. *Vollmer B., Cayatte V., Balkowski C. et al.* // *Astrophys. J.* 2001. Vol. 561. P. 708.
16. *Mirabel I. F., Morras R.* Cloud-Milky Way collisions in the outer Galaxy // *Ibid.* 1990. Vol. 356. P. 130.
17. *Heap S. R., Williger G. M., Smette A. et al.* STIS Observations of HE II Gunn-Peterson Absorption toward Q0302-003 // *Ibid.* 2000. Vol. 534. P. 69.

Тезисы студенческих докладов

Н. Э. Брита́вский

Одесский национальный университет

ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ СУЩЕСТВОВАНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Время существования космических объектов (КО) на низких орбитах ограничено вследствие торможения тела в разреженной среде верхней атмосферы Земли. Орбита КО медленно эволюционирует к круговой, и тело по спирали приближается к Земле, входя во все более плотные слои атмосферы. Сила торможения зависит от плотности среды, массы и площади поперечного сечения КО. Конструктивные особенности КО определяют величину коэффициента торможения CD , значение которого не всегда известно для реального движения КО. Это сильно затрудняет прогноз времени жизни КО до входа в плотные слои атмосферы, разрушения и сгорания.

В работе описана методика, основанная на использовании программы «Satevo» Алана Пикапа (A. Pickup), которая позволяет рассчитать эволюцию элементов орбиты с учетом статической модели атмосферы Земли. На основе реальных наблюдений за изменением торможения КО вычисляются действующие на наблюдаемом интервале значения параметра торможения, наилучшим образом удовлетворяющие наблюдениям. Это позволяет повысить точность прогноза момента прекращения существования КО. Работа программы иллюстрируется на примере расчета момента падения украинского ИСЗ «Сич-1М», которое реально произошло в апреле 2006 г.

СВОЙСТВА СЕМЕЙСТВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОРБИТ В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ЗВЕЗДНОМ БАРЕ

Построена математическая модель для расчета траекторий движения частиц во внешнем гравитационном неосесимметричном поле. Изучено влияние неосесимметричной части потенциала на семейство периодических орбит x_1 и $4/1$ с целью определения свойств наблюдаемых галактических баров.

В используемой модели галактики гравитационный потенциал образован осесимметричной подсистемой и неосесимметричной компонентой, обусловленной баром. Уравнения движения для пробных частиц в неинерциальной системе отсчета, связанной с вращающимся баром, интегрировались численно.

Полученные в результате интегрирования семейства орбит вытянуты вдоль большой оси бара, орбиты семейства x_1 , приближаясь к $4/1$ резонансу и вне его, образуют петли на концах, орбиты семейства $4/1$ в области резонанса становятся практически прямоугольными и развивают петли вне большой и малой осей. Дополнительно были выделены траектории, вытянутые вдоль линии, перпендикулярной главной оси бара. Это семейство x_{-1} может играть важную роль в формировании внутренних баров в системах с двойными барами.

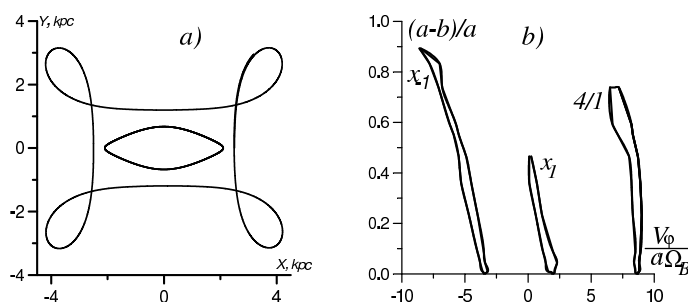


Рис. 1. а) Примеры траекторий движения в баре. б) Области существования семейств периодических траекторий при различных значениях угловой скорости и амплитуды бара $(a - b)/a$

А. В. Веледина
Санкт-Петербургский государственный университет

ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЯНИИ

Фотоны при рассеянии их свободными электронами изменяют свою энергию (комptonовское рассеяние). Многократное рассеяние описывается кинетическим уравнением. В зависимости от энергий фотонов и электронов уравнение имеет дифференциальную или интегральную форму. Путем численного решения таких уравнений прослежена эволюция спектра однородного и изотропного поля излучения при различных начальных условиях. Результаты представляют интерес, в частности, для описания реликтового излучения и тепловой истории Вселенной.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОМОСФЕРЫ СОЛНЦА ПО ФИЛЬТРОГРАММАМ КСаII

Наблюдение Солнца велось в период с 13 по 29 июня 2006 г., в течение которого не было замечено его высокой активности, поэтому снимки идентичны. В результате работы были получены снимки Солнца, представлены описания, которые производились с целью наблюдения за его активностью и хранятся в архиве. С помощью этих снимков можно прогнозировать состояние магнитного поля Земли, предупреждать людей о магнитных бурях, влияющих на здоровье и различные технические средства. На снимке от 15.06.06 изображен полный диск Солнца в линии КСаII. Он получен на хромосферном телескопе в линии КСаII, эта спектральная линия образуется на высоте 3000 км от фотосферы. Солнце покрыто хромосферной сеткой, которая, в свою очередь, образована спикулами. Ячейки хромосферной сетки размером около 30 000 км. На западе и на востоке Солнца имеются яркие активные области; это факелы, которые состоят из многочисленных прожилок, ярких точек и узелков факельных гранул. Факелы горят в местах сильного магнитного поля до 500 эрстед. На этом рисунке Солнце спокойное, находится в минимуме, нет больших групп пятен и вспышек. 21.06.06 на востоке лимба Солнца имеется темное волокно (протуберанец), более плотные и холодные облака, светящиеся примерно в тех же спектральных линиях, что и хромосфера. Протуберанцы — наиболее грандиозные образования в солнечной атмосфере, их длина достигает сотен тысяч километров, хотя ширина не превышает 6 000—10 000 км. На фильтрограммах, полученных 29.06.06, имеются две группы пятен на востоке области, где отчетливо видны ведущее (западное) и хвостовое (восточное). Пятна находятся в центральной стадии развития, в этот период они достигают наибольшей величины. Следовательно, через некоторое время, возможно, произойдет солнечная вспышка.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА ВО ВСЕЛЕННОЙ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

В 1964 г. Я. Б. Зельдович обратил внимание на роль небольших неоднородностей плотности, существующих в реальной Вселенной. Суть эффекта Зельдовича в том, что возникает небольшое систематическое искажение космологических тестов, которое делает пространство Вселенной, кривизна сечения которого в среднем равна нулю, в некотором смысле похожим на пространство отрицательной кривизны. С геометрической точки зрения эффект Зельдовича удобно описывать в терминах полей Якоби на геодезических пространственного сечения, вдоль которых и распространяются световые лучи. Задача о распространении света во Вселенной с неоднородностями сводится к задаче Коши для уравнения Якоби

$$y'' + K(x)y = 0, \quad y(0) = 0, \quad y'(0) = 1 \quad (1)$$

на геодезической риманова многообразия со случайной кривизной $K(x)$.

Мы представляем результаты численного моделирования решений уравнения Якоби: демонстрируется экспоненциальный рост типичной реализации поля Якоби; вычислены скорости роста типичной реализации, среднего и высших статистических моментов; показывается, что функция распределения расстояний между сопряженными точками на геодезической напоминает распределение Пуассона; дается оценка среднего расстояния между сопряженными точками, которая хорошо согласуется с теоретическими оценками сверху и снизу; оценен объем выборки случайных реализаций, необходимый для моделирования среднего и высших статистических моментов решения уравнения Якоби. В частности, показывается, что поля Якоби растут очень неравномерно (эффект перемежаемости).

А. А. Даниленко, Д. А. Зюзин, Д. С. Свинкин
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

ГЕОМЕТРИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ ДВУХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ И МОРФОЛОГИЯ ТУМАННОСТЕЙ ВОКРУГ БЫСТРОДВИЖУЩИХСЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Рассматривается столкновение двух сверхзвуковых потоков (СП): радиального (РП) и однородного (ОП). Геометрия есть набор из трех функций: две функции задают соответственно формы поверхностей двух ударных разрывов (УР), один из которых соответствует РП, а другой ОП и еще одна функция задает форму поверхности тангенциального разрыва (ТР), разделяющего РП и ОП внутри слоя, ограниченного поверхностями УР (СОУР). Результаты рассмотрения такой задачи применяются в последнее время для объяснения морфологии туманностей типа головной ударной волны, которые наблюдаются вокруг некоторых быстро движущихся нейтронных звезд. СП рассматривается полуаналитически вблизи оси симметрии в таком приближении функции, о которых говорилось выше, определяются набором числовых параметров, вычисление которых при заданных исходных параметрах потоков составляет главный результат работы. Основным отличием данной работы от известной работы [1], в которой СП рассматривалось впервые, является то, что мы не считали СОУР бесконечно тонким. Приближение тонкого слоя является грубым. Непонятно, как оценивать точность такого приближения; и кроме того, оно, разумеется, не дает возможности объяснить морфологию внутри СОУР, известную из наблюдений и численного моделирования. Главное состоит в том, что предложенный нами простой метод можно обобщить на случай ультрарелятивистского замагниченного РП, каким является РП пульсарного ветра, испускаемого нейтронной звездой.

Список литературы

1. Баранов В. Б., Краснобаев К. В., Куликовский А. Г. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // Докл. АН СССР. 1970. Т. 104, вып. 1. С. 41.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКОЖИВУЩИХ
МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ АРОК
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ
В ЛИНИИ HE 10830 Å**

Большой внеатмосферный коронограф (БВК) предназначен для изучения верхних слоев солнечной атмосферы, получения спектров короны и хромосферы Солнца. Инструмент может быть приспособлен для фотографирования или кинематографирования изображений короны и хромосферы Солнца при дополнительном использовании интерференционно-поляризационных фильтров и камеры. Для уменьшения атмосферного рассеяния БВК был смонтирован на высокогорной обсерватории. Подавляющая часть вещества во Вселенной сконцентрирована в звездах. В нашей галактике более ста миллиардов звезд, и только одна звезда настолько близка, что дает астрофизикам уникальную возможность детального исследования природы и структуры ее внешних слоев и множества возникающих в них явлений. Эта звезда — Солнце. Серьезное изучение его физической природы началось еще в первом десятилетии XVII в., когда Галилей предвосхитил результаты многих дальнейших исследований. В течение последующих четырех столетий накопился огромный материал, и тем не менее Солнце не перестает удивлять. За последние годы в изучении Солнца наступил новый этап, отличительной чертой которого является более глубокое проникновение в сущность процессов, происходящих в хромосфере. Значительные успехи достигнуты также в технике наземных наблюдений. Созданы вакуумные телескопы, в которых намного ослаблено влияние земной атмосферы, ограничивающего пространственное разрешение; усовершенствование спектрографической техники увеличило спектральное разрешение, а усовершенствование приемников излучения позволило улучшить пространственное, спектральное и временное разрешение. Изменение представлений о природе поверхности Солнца позволяет по-новому оценить многие явления и дать им более строгое научное объяснение.

Проведены исследования в линии He 10830 Å.

Р. Р. Загретдинов
Казанский государственный университет

ПЛАНИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ, ЦЕЛИ И МЕТОДЫ

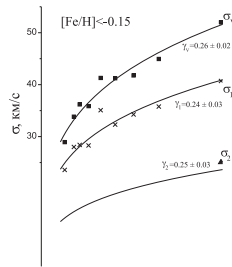
Перед проведением GPS-измерений высокого класса в городских условиях принято проводить планирование, которое позволяет выбрать оптимальное время измерений. Планирование заключается в составлении схемы препятствий, ограничивающих видимость спутников, а именно в получении сферических координат (A, z) характерных точек препятствий. На этапе обработки измерений было замечено, что при прохождении спутником видимой границы препятствия наблюдаются эффекты, причиной которых, возможно, является дифракция радиоволн, излучаемых спутниками. Нами поставлен эксперимент с целью проверки этой гипотезы.

**СПЕКТРОСКОПИЯ И МНОГОЦВЕТНАЯ
ФОТОМЕТРИЯ ПОЛЯРА МТ DRA (RX J1846.9+5538)**

Исследуемый объект — магнитная катаклизмическая переменная (тесная двойная система из белого и красного карликов). В зависимости от силы магнитного поля вырожденного компонента вещество, истекающее с нормальной звезды (красного карлика), будет по-разному вести себя. Если поле достигает десятков МГс, то плазма будет выпадать на полюса белого карлика, образуя аккреционные колонки (поляры). Если же белый карлик не так сильно замагничен, вокруг него будет образовываться аккреционный диск, и только после этого будут формироваться аккреционные колонки у полюсов. В таком случае имеют дело с промежуточным полярор. 21–22 марта 2006 г. на редукторе светосилы и щелевом спектрографе SCORPIO БТА САО РАН проведены спектральные наблюдения в диапазоне длин волн 3900–5600 Å. Получены эмиссионные спектры. Профили линий асимметричны, на некоторых фазах орбитального периода многопиковые. Интенсивности линий HeII 4686 и H β сравнимы. Этот факт, а также кривые лучевых скоростей указывают на то, что МТ Dra может принадлежать классу промежуточных полярор. В 2005 и 2006 гг. на телескопах Крымской астрофизической обсерватории К-380 и ЗТШ с диаметрами зеркал 38 и 260 см соответственно проведены фотометрические наблюдения в фильтрах В, V, R системы Джонсона и R_c системы Кузинса. В октябре 2006 г. наблюдалось довольно редкое для полярор явление — переход МТ Dra в низкое состояние блеска. Вероятнее всего, это вызвано уменьшением темпа аккреции вещества на белый карлик. Кривые блеска для высокого состояния по данным, полученным на ЗТШ в августе 2006 г., сильно отличаются от ранее полученных: они изрезаны короткопериодическими колебаниями. В фильтре R их амплитуда достигает 0.6^m. Показатель цвета В–V изменяется от 0.4 до 1.2, а V–R — от 0 до 0.7. В низком состоянии вид кривых блеска резко меняется по сравнению с высоким состоянием, показатель цвета В–V меняется от 0.1 до 1.2, а V–R — от 0.2 до 1.2. По данным фотометрии системы в низком состоянии с учетом межзвездного поглощения сделаны оценки температуры белого карлика, $T \sim 17\,000$ К.

ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЛИПСОИДОВ СКОРОСТЕЙ F-G-ЗВЕЗД ТОНКОГО ДИСКА ОТ ВОЗРАСТА

Сравнительный анализ параметров эллипсоидов скоростей металлических и малометаллических звезд галактического диска вместе с исследованием характера их изменения от возраста позволяют восстановить историю формирования и эволюции подсистемы. Для решения поставленной задачи из каталога [2] были отобраны звезды тонкого диска на основе вероятностного критерия, предложенного [1]. Все звезды мы разделили на две группы значением $[\text{Fe}/\text{H}] =$



-0.15 . Затем каждую группу разделили на равные по численности подгруппы ($n \approx 350$). Проведен сравнительный анализ всех исследуемых кинематических параметров. Все зависимости на высоком уровне значимости описываются степенным законом вида $\sigma_v = \alpha t^\gamma$ (коэффициенты корреляции $r \approx 0.97$). Такой характер зависимостей подтверждает гипотезу о том, что увеличение дисперсии скоростей звезд с возрастом происходит в результате релаксации. Из рисунка видно существенное различие величин полуосей эллипсоидов скоростей у звезд разной металличности, что может говорить о различии динамического состояния вещества, из которого они образовывались.

Список литературы

1. *Bensby T. et al.* // A&A. 2003. Vol. 410. P. 527.
2. *Nordstrom B. et al.* // Ibid. 2004. Vol. 418. P. 989.

РАСЧЕТ КОМПТОНИЗАЦИИ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Рассматривается задача о прохождении излучения с чернотельным спектром, соответствующим температуре $T_r = 10^5$ К, на нижнее основание цилиндра с полностью ионизованной плазмой, температура которой варьируется от $T_e = 10^7$ до 10^9 К. Получен спектр на верхней границе в трех постановках задач:

- 1) в плазме есть только комптоновское рассеяние;
- 2) формирование собственного излучения плазмы;
- 3) комптонизация исходного планковского излучения в присутствии собственного излучения слоя.

Обсуждаются различные астрофизические приложения данной задачи.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ
ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
БСВТ ИСЗФ СО РАН**

На Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) проводятся исследования ударной линейной поляризации в солнечных вспышках спектрополяриметрическим методом. Этот метод позволяет минимизировать влияние инструментальной поляризации с погрешностью до 10^{-2} благодаря нормированию интенсивности спектральной линии на интенсивность непрерывного спектра, линейная поляризация которого пренебрежимо мала. В результате интенсивность линии H в двух ортогонально поляризованных полосках спектра совпадает в отсутствие солнечной поляризации. Однако при наличии линейной поляризации во вспышке спектрополяриметрический метод не исключает погрешности определения величин параметров Стокса Q и U из-за их возможного взаимного «просачивания». В настоящей работе проведено исследование линейной инструментальной поляризации БСВТ при использовании вращения поляроида перед главным зеркалом. Определены 12 элементов матрицы телескопа, характеризующих линейную поляризацию. Использование матрицы позволяет уточнять наблюдаемые значения Q и U с точностью до 10^{-3} их величины.

Д. С. Насонов
Московский государственный университет

ИЗМЕРЕНИЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АБСОРБЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ

В данной работе сделана оценка эффективности применения абсорбционной ячейки с целью повышения точности измерений лучевых скоростей звезд. На основе наблюдательных данных, полученных на эшелле-спектрографе НЭС телескопа БТА, создан и отлажен алгоритм кросс-корреляционного анализа звездных спектров. С использованием полуэмпирического моделирования спектров оценена точность определения лучевых скоростей и устойчивость метода для различных отношений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 04-02-17564).

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ
И КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ДВИЖЕНИЙ
В АТМОСФЕРЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН**

Целью многих исследований, выполненных за последние десятилетия в области изучения колебательных процессов в полутени солнечных пятен, была не только необходимость понять саму природу осцилляций в солнечных пятнах, но и желание получить информацию, которую они содержат о глобальной структуре пятна над и под солнечной поверхностью. Есть существенная разница между осцилляциями в солнечном пятне и спокойной атмосфере, а внутри пятна — между осцилляциями в его тени и полутени. Причем речь идет не только об их спектральном составе, но и о самой природе их образования и существования. Наличие сильного магнитного поля в солнечном пятне и пространственный порядок, который оно локально накладывает на солнечную атмосферу, несомненно, оказывают влияние на характер колебаний. Неоценимое значение наблюдаемых характеристик распространения волн состоит в том, что они несут уникальную информацию о структуре атмосферы, в которой распространяются. В частности, большие градиенты физических параметров среды могут сильно изменять характер распространения волн и колебаний. Примерами таких градиентов являются: градиент температур в области температурного минимума и в переходной области между хромосферой и короной; градиент напряженности магнитного поля (так называемый «магнитный купол») над активными областями; разные условия на границах тени и полутени, полутени и окрестностей пятна. В том числе эти градиенты могут привести к отражению некоторых мод волн. В ряде случаев отражающая способность среды зависит от горизонтальной длины волны и частоты самого колебания, т. е. в атмосфере могут присутствовать разные резонансные полости для разных горизонтальных длин волн и частот колебаний. В этом случае отражающая способность будет служить также и индикатором крутизны градиента. Пятна же, кроме того, могут дать полезную информацию об энергетическом вкладе волновых мод, а также об энергии, рассеивающейся на каждом уровне атмосферы.

Н. В. Панкратова¹, А. М. Соболев¹, М. С. Кирсанова²,
Т. С. Васюнина³, В. В. Крушинский¹

¹Уральский государственный университет, ²Институт
астрономии РАН, ³Институт астрономии общества М. Планка

ИНФРАКРАСНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛАСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД В РУКАВЕ ПЕРСЕЯ

Для получения полной картины процессов звездообразования необходимы сопоставление и анализ данных, полученных в различных диапазонах длин волн. Это дает возможность понять, что за объекты находятся в интересующей нас области, определить расстояния, возрасты, лучевые скорости и собственные движения. Для нас наиболее интересны объекты, расположенные в спиральном рукаве Персея. Причины этого следующие: объекты в этой детали Галактики обычно хорошо разделяются, что облегчает исследования; расстояния до объектов сравнительно невелики и можно видеть детали; в рукаве Персея, вероятно, располагается область коротации, — этот важный для определения структуры Галактики факт может быть установлен исследованиями особенностей звездообразования.

Целью работы является изучение инфракрасных и оптических свойств областей раннего звездообразования в рукаве Персея, связанных с мазерами метанола II класса и водяными мазерами, трассирующими наиболее ранние стадии образования массивных звезд. Были созданы по данным обзоров в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах каталог и атлас изображений этих областей в различных областях спектра. Для проведения статистического анализа проверялось наличие скоплений звезд в инфракрасном диапазоне (мода звездообразования), компактных зон НП (яркость и возраст образующихся звезд) и видимых в оптике развитых зон НП (глобальный механизм, стимулирующий звездообразование). Составлены диаграммы, отображающие статистику этих явлений, для водяных и метанольных мазеров. Показано, что для большинства объектов рукава Персея возможно детальное изучение ранних процессов звездообразования на современных крупных инфракрасных и радиотелескопах с использованием средств адаптивной оптики и интерферометрии.

ВЛИЯНИЕ 2S3 МЕТАСТАБИЛЬНОГО УРОВНЯ ГЕЛИЯ НА ИОНИЗАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ ТУМАННОСТИ

Ионизационная структура туманности определяется источником ионизации — одной звездой или группой. Но при моделировании также имеет значение правильный выбор модели туманности. В большинстве случаев используют многокомпонентные модели, включающие водород, гелий и иногда пылевые частицы. При расчете ионизационной структуры туманности обычно атомы рассматривают как одноуровневые системы, чего вполне достаточно в некоторых случаях. Но иногда это может давать существенно неточные результаты. Так, учет второго — 2s3 — метастабильного уровня гелия в столкновительных процессах играет важную роль в определении синглетно-триплетного баланса гелия в случае отклонения от состояния термодинамического равновесия. Поэтому учет влияния метастабильного уровня гелия представляет особый интерес для расчета ионизационной структуры газовой туманности.

В этой работе мы рассматриваем, как меняются радиусы зон Стремгрена при учете влияния метастабильного уровня и насколько критична ошибка в вероятности поглощения кванта электроном на уровне 2s3 гелия ($1.27 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$) при расчете ионизационной структуры.

С этой целью был посчитан ряд моделей ионизационной структуры для различных значений эффективной температуры центральной звезды и различных значений концентраций водорода и гелия в туманности с учетом и без учета метастабильного уровня гелия.

При рассмотрении полученных моделей выявились следующие особенности: увеличение радиуса Стремгрена во всех посчитанных моделях с метастабильным уровнем; варьирование вероятности поглощения мало влияет на ионизационную структуру.

НЕТОЧНОСТИ В СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЗВЕЗД КАТАЛОГА TYCHO-2 SPECTRAL TYPE

Сравнение спектральных параллаксов звезд каталога Tycho-2 Spectral Type с астрометрическими параллаксами звезд каталога Hipparcos показало хорошую корреляцию в 95 % случаев [1]. Однако в ряде случаев наблюдаются значительные различия (иногда — более чем на порядок) расстояний, определенных двумя методами.

Нами были подробно исследованы эти случаи. Удалось частично определить причину таких различий и способ их редукции. Наиболее часто встречается ошибка определения класса светимости для звезд поздних спектральных классов.

В некоторых случаях звезды, для которых оценки расстояний расходились, оказались необычными объектами, для которых невозможно произвести стандартную спектральную классифицию [2]. Например, HIP 117245, редкая яркая углеродная звезда C5II, известная переменная TX Psc. В силу этого различие оценок расстояний может указывать на принадлежность звезды к классу пекулярных объектов.

Список литературы

1. *Смирнов А. А.* Сравнение спектральных параллаксов звезд каталога Tycho-2 Spectral Type с данными каталога Hipparcos // Физика космоса: Тр. конф. Екатеринбург, 2006. С. 230.
2. *Jaschek, C., Jaschek, M.* The Classification of Stars. Cambridge University Press, 1990.

СОВРЕМЕННЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Современные численные методы интегрирования уравнений движения астероидов, сближающихся с Землей [1, 2, 3], базируются в основном на неявном одношаговом методе Эверхарта с постоянным шагом интегрирования. В окрестности особых точек вычислительные ошибки метода могут существенно расти [4]. В случае тесных сближений с планетами эллипс рассеяния достаточно вытянут, поэтому даже незначительные ошибки в начале могут привести к ошибкам порядка миллиона километров через некоторое время.

В работе исследуются как сам метод Эверхарта (в отечественной литературе практически недостаточно работ по данной тематике [5, 6]), так и похожие на него методы на примере астероида 2004 MN4 Апофис, имеющего тесное сближение с Землей и проходящего на расстоянии 37500 км от центра нашей планеты. Именно для этого астероида существует вероятность столкновения после 2036 г., и поэтому обозначенная выше проблема весьма актуальна.

Список литературы

1. *Everhart E.* Implicit single methods for integrating orbits // *Celestial mechanics*. 1974. Vol. 10. P. 35.
2. *Холл Дж., Уайт Дж.* Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений.
3. *Butcher J.C.* Integration processes baswd on Radau quadrature formulas // *Math. Comp.* 1964. Vol. 18. P. 233.
4. *Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990.
5. *Бордовщина Т. В.* Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984.
6. *Татевян С. К., Сорокин Н. А., Залеткин С. Ф.* Численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений на основе локальных многочленных приближений. С. 28.

ВЛИЯНИЕ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЛИПСОИДА СКОРОСТЕЙ

В данной работе находятся параметры эллипсоида скоростей в окрестности Солнца после исключения звезд, входящих в звездные скопления, и рассматривается отклонение результата от полученного по всей выборке. Параметры определяются линейной экстраполяцией к нулевому гелиоцентрическому расстоянию по данным каталога Г. А. Гончарова (ГАО РАН), составленного на основе базы данных OSACA. Средние скорости скоплений берутся из работы [1], затем по указанному каталогу находятся координаты центра и уточненные значения скоростей. Показано, что из реально имеющих скопления значимое отклонение производят только Гиады из-за их близости к Солнцу и большой скорости. Компонента U скорости Гиад (вдоль радиуса Галактики) относительно Солнца составляет около 40 км/с, расстояние до него 46 пк, выявлено 153 возможных члена скопления. При этом разность скорости по U до и после исключения звезд скопления составила 0.6 км/с. Другие компоненты скорости и дисперсии изменялись в пределах ошибок определения. Влияние на определение скорости пропорционально разности скорости скопления и средней скорости звезд, числу его членов и быстро падает с увеличением расстояния от Солнца, причем это падение быстрее, чем ожидалось при предположении о линейной зависимости скорости центроида от расстояния, так что на расстоянии более 100 пк наличие, например, таких скоплений, как Гиады, почти не изменит результат.

Список литературы

1. Мюллери А. А., Флинн К., Орлов В. В. О возможности выделения компактных движущихся групп по данным о кинематике звезд // Астрон. журн. 2003. Т. 80. Вып. 3. С. 195.

МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ ТЕНИ В ФОРМАЛИЗМЕ ЧИСЛЕННОЙ ТЕОРИИ DE405

Одной из задач теоретической астрономии является вычисление траектории движения небесных тел. В таких случаях, как моделирование движения спутников, требуется учитывать давление света и солнечного ветра. Эти факторы влияют на движение по околоземной орбите. Особенно это сказывается на низких спутниках, которые регулярно попадают в земную тень и дольше находятся в ней.

В данной работе мы описываем условия освещенности искусственного спутника Земли. С этой целью создан алгоритм, который позволяет на основе численной американской теории DE405 получать расположение и размеры земной тени в интервале от 1600 до 2200 г. Земная тень представлена в виде эллиптического конуса, в основании которого лежит меридиональное сечение земного сфероида с полуосями 6378 км 6357 км. Рассеяние солнечного света в земной атмосфере не учитывается.

Описанная модель реализована на языке Delphi 7 и подготовлена к апробации в Центре приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля в г. Дунаевцы Хмельницкой области (Украина).

Список литературы

1. *Токовенко А. А.* Модель солнечной системы // Физика космоса: Тр. конф. Екатеринбург, 2006. С. 257.

**ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ
НИЗКОЧАСТОТНОГО КОГЕРЕНТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В настоящей работе построены профили просуммированного по первым гармоникам когерентного синхротронного излучения пульсаров в рамках веерной модели излучения пульсаров Радхакришнана-Кука. Для идентификации с экспериментально наблюдаемыми профилями предлагается использовать целый набор следующих параметров: угол наклона магнитной оси пульсара, углы, образованные лучом зрения с осью вращения пульсара и с направлением его магнитной оси. Кроме того, можно варьировать параметры самого синхротронного излучения: энергию электронов, частоту излучения, напряженность магнитного поля, радиус кривизны траектории электронов, а также плотность распределения и число электронов в плазменных сгустках и т. д. Наконец, особенно важным является то обстоятельство, что с применением современной компьютерной графики становится возможным и решение обратной задачи: исходя из экспериментально наблюдаемых профилей излучения пульсаров, построить соответствующую индикатрису излучения и таким образом определить расположение и кинематику источника излучения в магнитосфере пульсара.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛАБЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ПОЛОСЕ ГЛУБОКИХ ОБЗОРОВ НЕБА НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Цель настоящей работы — исследовать возможности получения некоторых статистических сведений о радиоисточниках сантиметрового диапазона на основе многолетних глубоких многочастотных обзоров неба на РАТАН-600 (ХОЛОД, RZF). Мы попытались исследовать возможность оценки средних спектральных индексов, имея каталог неба на одной частоте (NVSS, 1.4 ГГц) и массивы данных на другой (РАТАН-600, 3.9 ГГц), где только часть объектов видна индивидуально, а остальные лежат ниже порога обнаружения.

Этот метод полностью свободен от эффекта насыщения (шума неразрешаемых источников), реализуется чувствительность $T_{sys}/(dfT)^{1/2}$, где df — полоса радиометра (700 МГц на волне 7.6 см); T — суммарное время нахождения всех NVSS объектов в диаграмме РАТАН-600. Это время сегодня для RZF-обзора составило около 100 000 с.

Для нахождения средних спектральных индексов весь каталог NVSS в той части, которая приходится в полосу обзоров, разбивается на ряд интервалов по плотности потока источников. Такое разбиение проводится для получения нормальной выборочной статистики.

В результате накопления уверенно выделен сигнал для популяции самых слабых NVSS источников с отношением сигнал—шум 50 и с плотностью потока примерно 1 мЯн на 3.9 ГГц. Получена кривая распределения средних спектральных индексов в интервале плотностей потоков NVSS каталога от 1 до 400 мЯн. У этой кривой три особенности: ее поведение от 400 до 20 мЯн определяется вкладом FR II (Fanaroff-Riley II); от 20 до 7 мЯн преобладает вклад галактик с бурным звездообразованием (SBG); в области с потоками меньше 7 мЯн кривая нуждается в уточнении.

Разработанный метод позволил достичь чувствительности по плотности потока около 20 мкЯн в сантиметровом диапазоне волн, продемонстрировал свободу от фундаментального ограничения на чувствительность, связанного с шумом фоновых радиоисточников.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ
КРУПНОМАСШТАБНЫХ
СОЛНЕЧНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА**

Прогноз солнечной активности и межпланетной среды имеет большое практическое народно-хозяйственное значение и является актуальной задачей современной солнечно-земной физики. Результаты исследований солнечной активности и межпланетной среды сделали реальным решение задач прогноза, а также разработку инструментов и техники наблюдений для прогностических целей. Разработанный в СибИЗМИР СО АН СССР солнечный телескоп оперативных прогнозов (СТОП) предназначен для получения информации о солнечных магнитных полях, которая является наиболее важной для решения прогностических задач. Кроме прогноза вспышечной активности большое практическое значение имеет прогноз структуры межпланетного магнитного поля и высокоскоростных потоков солнечного ветра. Выполнена программа для расчета и анализа данных на языке программирования IDL.

МЕХАНИЗМЫ РАЗОГРЕВА ЗВЕЗДНОГО ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА

Данные наблюдений о кинематике звездного населения в нашей Галактике демонстрируют рост дисперсии скоростей с возрастом звезд. Дисперсия скоростей молодых звезд составляет $\simeq 10$ км/с, а у старых звезд лежит в пределах $30 \div 50$ км/с. Разогрев звездного диска принято объяснять релаксацией на ГМО, спиральных волнах плотности, массивных черных дырах. Каждый из механизмов в отдельности не способен объяснить наблюдаемую картину. В данной работе изучено влияние шаровых скоплений и галактической ударной волны (УВ) в газе на рост дисперсии скоростей (см. рисунок).

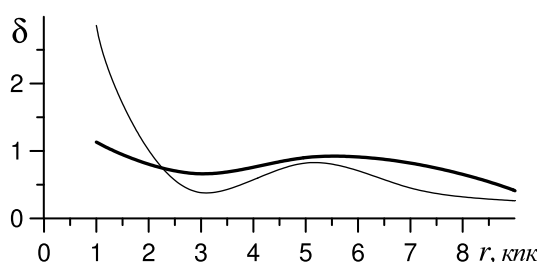


Рис. 1. Радиальные распределения темпа роста дисперсии скоростей звезд δ [км/(с· 10^9 лет)] в двух разных моделях

Построенная модель базируется на численном интегрировании уравнений движения для большого числа пробных частиц (до 10^4) во внешнем гравитационном поле с учетом динамики 500 шаровых скоплений, параметры которых основаны на данных наблюдений. В расчетах с УВ последняя задавалась в виде стационарного распределения объемной плотности, от которого рассчитывался гравитационный потенциал. Показано, что вклад в наблюдаемую дисперсию только от шаровых скоплений за 5 млрд лет может составлять от 3 до 15 км/с на разных расстояниях от центра. Рассеяние звезд на трехмерной ударной волне в газе также вносит заметный вклад в разогрев звездного диска.

СОДЕРЖАНИЕ ИТТРИЯ И ЦИРКОНИЯ У ЗВЕЗД РАЗЛИЧНЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ НАСЕЛЕНИЙ

Определение содержания химических элементов, построение зависимостей их относительного изменения на разных этапах жизни Галактики необходимо для понимания физики процессов, протекающих в звездах и в Галактике в целом. В данной работе исследуются элементы, которые могут образовываться только в процессах нейтронного захвата (s - и r -процессы).

Были определены относительные содержания иттрия и циркония для 66 холодных карликов и субгигантов. Это звезды главной последовательности, спектральные классы G — M, содержание железа $[\text{Fe}/\text{H}]$ изменяется в диапазоне от 0.25 до -2.43 . Среди них есть как молодые, так и очень старые звезды. Определения содержаний проводились методом синтетического спектра в рамках предположения ЛТР при помощи программы SIU. Были использованы спектральные наблюдения высокого разрешения (955; 8 710; 955; 8 776; 40 000 и 60 000) с отношением сигнал/шум от 50 до 200.

Анализ полученных результатов проводился с учетом принадлежности звезд к различным типам населения. Построены отношения содержаний Zr и Y к Fe и Ba: $[\text{Y}, \text{Zr}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$, $[\text{Y}, \text{Zr}/\text{Ba}] - [\text{Ba}/\text{H}]$, а также $[\text{Zr}/\text{Y}] - [\text{Ba}/\text{H}]$.

Анализ показывает, что Zr и Y имели общее происхождение в эпоху формирования гало, а в эпоху активного формирования толстого диска наблюдалось уменьшение скорости производства Zr относительно Y. У звезд гало и толстого диска также наблюдается увеличение отношения $[\text{Zr}/\text{Ba}]$ с уменьшением содержания Ba. Эти закономерности не описываются имеющимися моделями химической эволюции Галактики. Также отмечается небольшое падение отношений Zr/Ba и Zr/Y с ростом содержания бария для звезд тонкого диска. Но в среднем относительные содержания иттрия и циркония в звездах тонкого диска — солнечные. Это указывает, что в эпоху формирования тонкого диска в обогащении межзвездной среды тяжелыми элементами главную роль играли звезды асимптотической ветви гигантов, что соответствует предсказаниям теории химической эволюции Галактики для основной компоненты s -процесса.

ХАРАКТЕР СВЯЗИ МЕЖДУ ВОЗРАСТОМ И МЕТАЛЛИЧНОСТЬЮ В ТОНКОМ ДИСКЕ

Целью настоящей работы является подробное исследование диаграммы «возраст—металличность». В качестве источника мы использовали Женево-Копенгагенский каталог, в котором приведены основные параметры для ≈ 14000 F—G-карликов [1]. Из этого каталога мы составили выборку звезд тонкого диска, для получения которой был применен вероятностный критерий [2]. Для звезд F0—G5 получившаяся выборка оказалась полной в пределах 70 пк.

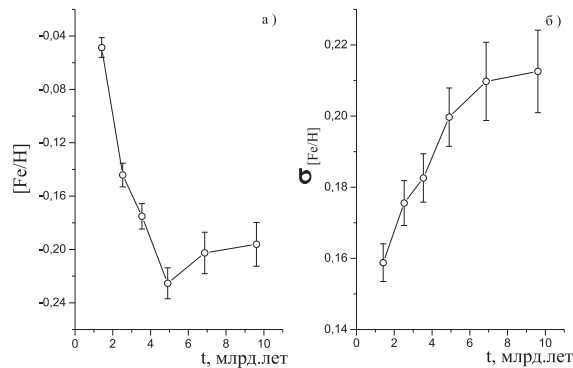


Рис. 1. Зависимость от возраста среднего значения (а) и дисперсии металличности (б), по данным каталога [1]. Бары на рис. «а» — дисперсии металличности; а на рис. «б» — ошибки $\sigma_{[Fe/H]}$

Всесторонний анализ возможных селекционных эффектов выборки показывает, что наблюдаемые на рисунке 1 зависимости действительно отражают реальное изменение с возрастом, как среднего значения, так и дисперсии металличности в галактическом диске.

Список литературы

1. Nordstrom B. et al. // Astron. Astrophys. 2004. Vol. 418. P. 989.
2. Bensby T. et al. // Ibid. 2003. Vol. 410. P. 527.

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ ИСТОЧНИКА НА ФОРМУ И ПОЛОЖЕНИЕ МАЗЕРНЫХ ПЯТЕН В МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛОЯ

В данной работе проводится численное исследование вопроса о том, как движения мазерных пятен отражают вращательные движения объектов. Появление мазерных пятен может определяться корреляциями в турбулентном поле скоростей [1] и [2]. Поле турбулентных скоростей при этом может быть смоделировано статистическими методами в приближении, что спектр турбулентности описывается функциями Колмогоровского типа.

Рассматриваются эффекты влияния вращения объекта как целого на положение мазерных пятен в изображении объекта, изменение интенсивности и взаимного расположения отдельных мазерных пятен и усредненный спектр мазерной области. Проводилось моделирование в рамках турбулентной модели водяных мазеров и мазеров метанола II класса для источника $W3(OH)$.

Установлено, что изменение изображения объекта за счет годичного вращения Земли по орбите пренебрежимо мало, что говорит о возможности использования метода тригонометрических годичных параллаксов для измерения расстояний до объектов. Однако вращательные движения самих объектов могут приводить к заметным изменениям формы и расположения пятен.

Список литературы

1. Sobolev A. M., Wallin B. K., Watson W. D. // *ApJ*. 1998. Vol. 498. P. 763.
2. Sobolev A. M., Watson W. D., Okorokov V. A. // *Ibid*. 2003. Vol. 590. P. 333.

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН
ЛИНИИ Н И ПАРАМЕТРОВ СТОКСА В ПРОТОННОЙ
ВСПЫШКЕ ДЛЯ ЛИНИЙ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ
ОБРАЩЕНИЕМ И БЕЗ**

Было проведено сопоставление между эквивалентными ширинами линии Н во вспышке и эквивалентными ширинами параметров Стокса. Между этими величинами зависимость не выявлена. Это сопоставление было проведено отдельно для линий с центральным обращением и без него. Получено, что в линиях с центральным провалом ненулевые значения WP имеют большие значения (для Q-параметра $WP \sim 0.5-0.55$, для U-параметра $WP \sim 0.4-0.5$), а для линий без центрального провала (для Q-параметра $WP \sim 0.25-0.30$, для U-параметра $WP \sim 0.3-0.35$).

Тезисы кратких сообщений

Р. А. Алексейчук

Волгоградский государственный университет

ПОВЕДЕНИЕ ОБЛАЧНОЙ КОМПОНЕНТЫ ГАЛАКТИКИ В ОБЛАСТИ РАДИУСА КОРОТАЦИИ

В рамках гидродинамического моделирования проводилось моделирование течения межзвездного газа при наличии гравитационного потенциала, создаваемого спиральным рукавом галактики, распада межзвездной среды на облака и межоблачный газ и, как частный случай, исследовалась динамика межзвездной среды вблизи области коротации.

Нами принималась следующая модель межзвездной среды: приближение сплошной среды; двухкомпонентная модель; компоненты в тепловом равновесии.

Проводилось несколько серий моделирования с различными начальными условиями: протекание межзвездного газа через гравитационный потенциал без учета и с учетом нагрева—охлаждения; взаимодействие межзвездной среды («мелкие» и «крупные» облака) со спиральным рукавом галактики вблизи радиуса коротации с учетом нагрева—охлаждения.

На основе проведенных серий моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Учет нагрева—охлаждения межзвездного газа приводит к тому, что ударные фронты становятся более узкими и нечеткими. В центре коротационной области наблюдается сильное уплотнение межзвездного газа.
2. Учет многофазности приводит к возникновению сильных вихревых течений. Расчеты свидетельствуют, что чем крупнее становятся облака, тем менее турбулизуется межзвездная среда. В области коротации в основном присутствуют молекулярные облака размером свыше 10—20 пк.
3. Учет искривления гравитационного потенциала в двумерном пространстве приводит к еще более сильным вихревым течениям, которые также становятся менее интенсивными при «укрупнении» облаков.

Р. В. Балуев
Санкт-Петербургский государственный
университет

ПОИСК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ МЕТОДОМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Описываются возможности, некоторые основные положения, алгоритмизация и перспективы метода поиска внесолнечных планет, основанного на доплеровской спектроскопии.

Л. Е. Быкова, Т. Ю. Галушина, А. П. Батурин
НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета

О ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЕ ПОСТРОЕНИЯ ПОИСКОВЫХ ЭФЕМЕРИД АСТЕРОИДОВ

В докладе предлагается методика расчета поисковых эфемерид астероидов для тех случаев, когда не удастся обнаружить объект по расчетной эфемериде, даваемой на основе некоторой номинальной орбиты. Такая ситуация возникает обычно с нумерованными астероидами, когда объект наблюдался непродолжительное время и неопределенность в оценке параметров его орбиты слишком велика. Одной из главных причин больших ошибок эфемерид является короткая дуга наблюдений и соответственно плохая обусловленность задачи оценки начальных параметров движения.

Очевидно, что в таких сложных случаях недостаточно вычислять поисковую эфемериду для некоторой номинальной орбиты. Чтобы математическое прогнозирование движения астероида имело практическую ценность, необходимо построение достоверной области возможных движений объекта на требуемом интервале времени. Тогда поисковая эфемерида может быть представлена как проекция области возможных движений на небесную сферу в заданный момент времени.

В работе представлен комплекс программ, решающих эту задачу, и показаны результаты апробации данного комплекса на примерах как нумерованных, так и нумерованных астероидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (код проекта РНП.2.2.3.1.1537).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ
И СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗВЕЗД
В ПОЛЕ РЗС NGC 6882/5**

Данная работа посвящена определению положений и собственных движений звезд в поле двойного рассеянного звездного скопления NGC 6882/5 (примерные координаты центра области $\alpha = 20^m 12^h$, $\delta = +26^\circ 49'$). Чтобы понять, реальны ли эти скопления, необходимо определить собственные движения их вероятных членов. Если они окажутся примерно одинаковыми по направлению и численному значению, то можно утверждать, что это действительно гравитационно связанная система. В свою очередь, чтобы определить собственное движение, необходимо знать положение звезды на несколько эпох. В этой работе последняя эпоха — 22 ноября 2006 г., именно тогда были получены снимки с СБГ камеры Коуровской обсерватории. В 2006 г. на СБГ была установлена ПЗС-матрица с полем примерно $1 \times 0.6^\circ$, позволяющая получать изображения до 17-й звездной величины. Таким образом, возникла необходимость исследовать возможности камеры при определении точных положений звезд. Первые эпохи будут обеспечены оцифрованными обзорами неба POSS I и POSS II. Для того чтобы определить положение некоторого объекта на небесной сфере, необходимо для начала определить его прямоугольные координаты x и y на ПЗС-изображении, а затем применить стандартные процедуры астроредукции. В качестве опорного использован каталог UCAC-2 с исключенными самыми слабыми звездами. В результате измерений по пяти изображениям получен каталог точных положений 297 звезд в поле РЗС NGC 6882/5 на эпоху 2006.11.

ЗВЕЗДЫ — ДВОЙНИКИ И АНАЛОГИ СОЛНЦА

В звездном населении Галактики звезды солнечного типа являются одной из важнейших групп объектов. Среди звезд солнечного типа выделяют так называемые *звезды—аналоги* Солнца. В 1989 г. Кейрель де Стробель и Бентолила предложили концепцию *полного аналога (двойника)* Солнца.

В данной работе исследована выборка из 15 фотометрических аналогов Солнца, отобранных по близости к солнечным показателям цвета. Спектры высокого разрешения этих звезд получены авторами на куде-эшелле спектрометре, установленном на 2-м телескопе обсерватории Терскол. Определены основные атмосферные параметры (T_{eff} , $\lg g$, $[Fe/H]$), проведен расчет химического состава атмосферы каждой звезды для более чем 30 химических элементов.

На базе достаточного числа спектральных линий были рассчитаны ЛТР-содержания 33 химических элементов от лития до европия (для подавляющего большинства звезд впервые в таком объеме). По химическому составу атмосфер звезд выборки разделяются на три группы: четыре звезды с избытками металлов, пять звезд показывают пониженное содержание элементов, и лишь шесть фотометрических аналогов Солнца показывают солнечный химсостав.

Анализ всех звезд нашей выборки показывает, что только четыре звезды (HD 10307, HD 34411, HD 146233 и HD186427) удовлетворяют всем критериям, предъявляемым солнечным аналогам.

Подобным образом на основе опубликованных данных о параметрах самих звезд и их атмосфер, фотометрических и кинематических характеристик, а также химического состава проведено исследование возможной аналогичности Солнцу 50 звезд с известными планетами, открытых в 1995—2000 гг., и в этой выборке найдена одна — HD 222582, которая практически по всем описанным критериям подходит под определение солнечного двойника.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №05–02–17744).

А. И. Галеев, И. Ф. Бикмаев,
В. В. Шиманский, Д. В. Иванова
Казанский государственный университет

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗД ТИПА δ ЩИТА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕЛЕСКОПЕ РТТ150

В декабре 2003 г. по наблюдениям на 1.5-м российско—турецком телескопе, установленном в Турецкой национальной обсерватории, с помощью установленной в фокусе Кассегрена ПЗС-камеры ANDOR размерами 2048×2048 пиксел была открыта переменность звезды GSC 4813-0981, блеск которой в фильтре V меняется в пределах 11.13—11.15 зв. вел. и с периодом менее 1 ч. На основе всех наблюдательных данных с помощью программы WINEFK (В. П. Горанский, ГАИШ) вычислен вероятный период переменности (эфемериды $JDH_{Max} = 2452994.487 + 0^d.0337062E$), который равен 48.5 мин. По периоду и амплитуде переменности, а также по характеристикам кривой блеска GSC 4813-0981 относится к пульсирующим переменным типа δ Щита. Анализ спектров с разрешением 5.2 \AA позволил определить параметры атмосферы GSC 4813-0981: $T_{\text{эфф}} = 8700 \text{ K}$, $\log g = 3.95 \text{ dex}$ и химический состав, близкий к солнечному. Полученные 14 значений лучевой скорости на временном интервале около 2 ч показывают периодические изменения с периодом, равным фотометрическому (48 мин), и полуамплитудой 38 км/с. Это соответствует пульсациям А-звезды типа δ Щита с радиусом порядка $2.3 R_{\odot}$ и массой $1.7 M_{\odot}$.

В 26—29 января и 16 апреля 2006 г. были проведены наблюдения пяти известных пульсирующих звезд типа δ Щита. Результаты первичной обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Полученные параметры ряда звезд типа δ Щита

Звезда \ Параметр	$T_{\text{эфф}}$, K	$\log g$	[Fe/H]	M_V
АО CVn	7545	3.70	0.38	0.03
CP Boo	6205	3.72	0.04	2.13
DG Leo	7770	3.64	0.26	0.11
HD 87696	8205	4.56	-0.01	2.28
KW Aur	7800	3.73	-0.14	0.45

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №05-02-17744), президентской программы «Ведущие Научные школы России» (НШ-784.2006.2) и Академии наук Республики Татарстан (молодежный грант 02-10/2006).

© А. И. Галеев, И. Ф. Бикмаев, В. В. Шиманский, Д. В. Иванова, 2007

ЭФФЕКТ ПРИЛИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ОЦЕНКЕ ВОЗРАСТА ТДС

За последние три десятилетия были накоплены и обработаны наблюдательные данные о вековых изменениях в положении периастрия в тесных двойных системах (ТДС), связанных с искажениями формы обоих компонентов ввиду их приливного взаимодействия.

В данной работе на базе новых треков рассчитана широкодиапазонная (от НПП до возраста Галактики) сетка изохрон, которая использована для оценки возрастов 112 ТДС из каталога затменно-переменных систем с разделенными компонентами с известными фотометрическими и спектроскопическими элементами орбит. Полученные результаты сопоставлены с оценками возрастов, выполненными для этих же систем, но с использованием сетки эволюционных теоретических моделей одиночных звезд [1].

Наблюдается «эффект омоложения» для систем, рассчитанных на новых треках, который заметнее всего выражен у маломассивных ТДС с суммарной массой компонентов, меньшей $3.5 M_{\odot}$, для которых приливное взаимодействие успевает оказать существенное влияние за время ядерной эволюции. Важность учета приливного взаимодействия также следует из сравнения длительности эволюционных шкал. Так ядерная шкала одиночных звезд на ГП с массой $1\text{--}1.5 M_{\odot}$ варьирует в диапазоне 3—10 гигаlet, а длительность динамической шкалы приливного торможения может составлять 0.5—5 гигаlet.

В работе показано, что согласование возрастов главного и вторичного компонентов, рассчитанных по новым трекам с учетом приливных эффектов, улучшилось.

Список литературы

1. *Maeder A., Meynet G.* Tables of evolutionary star models from 0.85 to $120 M_{\odot}$ with overshooting and mass loss. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1988. Vol. 76. P. 411.

М. С. Кирсанова¹, А. М. Соболев²,
Л. Е. Юханссон³, М. Томассон³, А. П. Цивилев⁴

¹Институт астрономии РАН,

²Астрономическая обсерватория УрГУ,

³Onsala Space Observatory,

⁴Пушчинская радиоастрономическая обсерватория
физического института им. П. Н. Лебедева РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ G173.69+2.87

Проведено картографирование комплекса массивного звездообразования G173.69+2.87 в радиолиниях CS(2 – 1) и ¹³CO(1 – 0) на 20-м телескопе в Онсала. Показано, что комплекс состоит из нескольких плотных молекулярных ядер и представляет собой часть молекулярной оболочки, окружающей область ионизованного водорода S 235 с юго-восточной стороны. В направлении на пики молекулярного излучения проведены наблюдения радиолиний NH₃(1, 1) и (2, 2) на 22-м телескопе в Пуццино. Спектры излучения молекул обнаруживают наличие нескольких скоростных компонент. В областях уплотнений молекулярного газа присутствуют скопления молодых звезд, проявляющиеся в инфракрасном диапазоне. Это свидетельствует о том, что расширение зоны НН приводит к уплотнению окружающего газа и инициирует звездообразование. Наблюдения в радио-, инфракрасном и оптическом диапазонах показывают, что звездный ветер молодых звездных объектов и скоплений приводит в движение окружающий их газ.

А. В. Кожевникова¹, И. Ю. Алексеев²,
П. А. Хекерт³, В. П. Кожевников¹

¹Астрономическая обсерватория УрГУ,

²Крымская Астрофизическая обсерватория,

³Университет штата Западная Каролина

АКТИВНОСТЬ ДВУХ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ТИПА RS CVN — BH VIR И WY CNC

BH Vir и WY Cnc являются тесными двойными запятненными системами поздних спектральных классов, принадлежащими к короткопериодическому классу систем типа RS CVn. В работе представлены результаты многоцветных фотометрических наблюдений, полученных в 2003—2006 гг. в трех обсерваториях: АО УрГУ, КрАО и Маунт Лагуна. На всех полученных кривых блеска выявлена вращательная модуляция блеска, которая обычно объясняется наличием холодных пятен. В модели зональной запятненности проведен анализ на интервале 40 лет. Показано, что во все эпохи пятна занимали околоэкваториальные и среднеширотные области, максимальная площадь запятненности достигала 21 % поверхности звезды у WY Cnc и 29 % у BH Vir. Разности температур между спокойной фотосферой и пятнами составляли 1800 К (WY Cnc) и 2300 К (BH Vir). Обнаруженные долговременные изменения блеска BH Vir позволяют предположить цикличность активности с вероятным периодом 22 года. Показано, что в обеих системах пятна группируются на двух выделенных долготах, разделенных приблизительно на половину орбитального периода. В BH Vir эти долготы в течение 40 лет фиксированы (0 и 180°), а в WY Cnc наблюдается дрейф долгот в направлении вращения звезды со скоростью 3.8°/год, что может указывать на цикличность миграции активных долгот с периодом 47±6 лет. В феврале 2006 г. нами впервые была зарегистрирована мощная вспышка в системе WY Cnc, произошедшая вблизи максимума запятненности звезды в эпоху наиболее равномерного заполнения пятнами обеих полюсфер звезды в период повышенной хромосферной и корональной активности. Вычисленная интегральная энергия вспышки оказалась высокой (10³⁵ эрг в полосе В) по сравнению с другими системами типа RS CVn. Определены параметры компонентов систем — массы, радиусы, светимости и показано, что системы далеки до заполнения полостей Роша.

© А. В. Кожевникова, И. Ю. Алексеев,
П. А. Хекерт, В. П. Кожевников, 2007

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В СИСТЕМЕ SS Cyg МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

SS Cyg является ярчайшей из карликовых новых звезд на северном небе и наблюдается уже более ста лет. За столь значительный период наблюдений было накоплено большое количество информации об этой системе. Однако до сих пор многие вопросы о ее физических свойствах остаются открытыми.

В 1988 г. был предложен метод доплеровской томографии для наблюдательного исследования характера движения газа в тесных двойных системах [1]. Применительно к задаче об SS Cyg в случае небольшого угла между магнитной осью и осью вращения карлика с помощью 3D доплеровской томографии возможно удастся наблюдать потоки вещества в аккреционных колонках на магнитные полюса звезды. На 2D доплеровских картах тоже должны появиться характерные детали, которые некоторые исследователи связывают с наличием магнитного поля, о них речь пойдет ниже.

У данной работы было две основные цели: во-первых, исследование движения газа в системе SS Cyg методом доплеровской томографии; во-вторых, исследование возможностей телескопа Zeiss-2000 в ТФ ИНАСАН для решения томографических задач.

В работе приведены результаты спектральных наблюдений, проведенных нами в августе 2006 г. на 2-м телескопе Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН (п. Терскол, Кабардино-Балкария). Построены двумерные доплеровские карты системы в трех линиях H_α , H_β , H_γ . Проводится сравнение с доплеровскими картами для системы U Gem. В заключение обсуждаются возможности проведения дальнейших спектральных наблюдений катаклизмических переменных на телескопе Zeiss-2000.

Список литературы

1. Marsh T. R., Horne K. // MNRAS. 1988. Vol. 235. P. 269-298.

ВЕРОЯТНЫЕ ПРИЧИНЫ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО АЛЬБЕДО УРАНА

Среди планет-гигантов Уран выделяется своими уникальными свойствами. Большой наклон оси способствует тому, что за весь 84-летний орбитальный период с Земли наблюдают изображения с планетоцентричными широтами от 0 до 90°. В данной работе использовался метод определения параметров атмосферы по данным об интенсивностях деталей комбинационного рассеяния, разработанный в работе [2]. По наблюдательным данным о спектральном значении геометрического альбедо за 1981 [5], 1983, 1985 [1], 1993 [3] и 1995 гг. [4] были определены спектральные значения отношений составляющих оптических толщин: τ_a/τ_R , τ_κ/τ_S (где τ_a , τ_R — аэрозольная и газовая рассеивающие составляющие; $\tau_S = \tau_a + \tau_R$, τ_κ — поглощающая составляющая эффективной оптической глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения). Величины τ_a/τ_R и τ_κ/τ_S изменяются со временем. Не исключено, что полученные различия этих отношений обусловлены изменением положения Урана на орбите.

Список литературы

1. Дементьев М. С. Спектрофотометрические исследования атмосфер Урана и Нептуна // Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.03.03. Киев, 1999. С. 220.
2. Костокрыз Н. М. Комбинационное рассеяние в спектре атмосферы Урана с учетом ее неизотермичности // Кинематика и физика небесных тел. 2006. № 4. С. 254—259.
3. Karkoschka E. Spectrophotometry of the Jovian planets and Titan at 300 to 1000 nm wavelength: The methane spectrum // Icarus. 1994. Vol. 111. № 3. P. 967.
4. Karkoschka E. Methane, Ammonia, and temperature Measurements of the Jovian Planets and Titan from CCD-Spectrophotometry // Icarus. 1998. Vol. 133. P. 134.
5. Neff J. S. et al. Absolute Spectrophotometry of Titan, Uranus, and Neptune: 350—1050 nm // Ibid. 1984. Vol. 60. P. 221.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИИ СТЕПЕНИ
ИОНИЗАЦИИ В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ
МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

Ранее были обнаружены отличия в распределении областей излучения различных молекул. Особенно сильные различия между распределениями $\text{CS}(2-1)$ и $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$. Известно, что причиной различия относительных концентраций молекул в центральных областях холодных ядер малой массы является вымерзание некоторых из них на частицах пыли, которое происходит с различной эффективностью (для CS эффективность значительно выше, чем для N_2H^+). Сравнение температуры в пиках $\text{CS}(2-1)$ и $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ показало, что вариация температуры незначительна, т. е. только температурными эффектами не объясняют различия в распределении молекул.

Кроме вымерзания молекул на частицах пыли причиной различия распределения молекул может быть диссоциативная рекомбинация N_2H^+ . Тогда повышенное содержание электронов может приводить к уменьшению концентрации N_2H^+ . Образование молекул N_2H^+ происходит с одинаковой скоростью по всему облаку, поэтому влияние на различие в распределении этой молекулы может оказывать лишь ее разрушение. Для проверки этого предположения на основе наблюдений $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$ и $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$, выполненных в апреле 2006 г. на 20-м радиотелескопе обсерватории Онсала (Швеция), находилась степень ионизации в пиках $\text{CS}(2-1)$ и $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$.

Для большинства источников в пиках $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ степень ионизации оказалась меньше, чем в пиках $\text{CS}(2-1)$, т. е. вероятно различие в распределении молекул можно объяснить диссоциативной рекомбинацией N_2H^+ . Однако для проверки этого предположения требуется химическое моделирование. Для оценки степени ионизации использовались результаты химического моделирования Бергина и др., которые показали, что соотношения между степенями ионизации в пиках $\text{CS}(2-1)$ и $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ сохраняются, но сами значения на порядок меньше, чем рассчитанные в данной работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 06-02-16317) и программы ОФН РАН «Протяженные объекты в астрономии».

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРЖЕНИЯ РАДИОДЖЕТОВ ИЗ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Мы продолжаем серию работ, где показываем, что естественным образом, без привлечения дополнительных предположений, наблюдаемые структуры и поля скоростей могут быть объяснены в рамках сценария, отвечающего унифицированной схеме активности галактических ядер.

В данной работе будем исследовать спектр, морфологию и динамику струи, находящейся в гравитационном потенциале $\Psi \propto r^2$. Отметим, что волновые структуры, сформировавшиеся в струе во внутренней области ядра галактики, где потенциал хорошо аппроксимируется ньютоновским, не способны исказить волновую картину на рассматриваемом здесь участке струи. Во-первых, потому, что радиальная длина волны возмущений в потенциале точечной массы должна убывать с расстоянием от гравитирующего центра ($\lambda_r \propto r^{-1/2}$); во-вторых, ограничен радиус участка струи, на котором возможна энергетическая подпитка возмущений за счет механизма резонансного сверхотражения.

Проведенное численное моделирование показывает, что в эволюции моделируемой системы можно выделить три характерных этапа.

1. Вторжение сверхзвуковой струи в невозмущенную окружающую среду порождает в ней головную ударную оболочку. Оболочка начинает расширяться, достигает диска и порождает в нем ударную волну.

2. В квадратичном потенциале сила гравитации линейно растет с радиусом, поэтому головная часть струи очень быстро теряет скорость и останавливается.

3. Струя с постоянным темпом продолжает вкачивать энергию в рассматриваемую систему, и ситуация выходит на квазистационарный режим.

МОДЕЛЬ СБЛИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА АРОPHIS 99942 С ЗЕМЛЕЙ

Для более точного определения положений тел с учетом возмущения, вызванного другими телами Солнечной системы разработана компьютерная модель Солнечной системы. Модель, основанная на численной теории DE405/LE405, позволяет учитывать возмущения на объекты Солнечной системы от всех больших планет, Плутона и Луны. В работе промоделировано движение астероида Апофис 99942 в момент максимального сближения с Землей. Интегрирование системы выполнялось методом численного интегрирования Рунге-Кутты 10-го порядка с шагом 6 ч. Все положения больших планет, Плутона, Луны в процессе интегрирования заменялись на положения тех же тел, полученных из компьютерной модели Солнечной системы. Начальный вектор состояния для астероида взят из статьи [1] где приведены два вектора состояния, вычисленные отдельно по оптическим и радарно-оптическим (комбинированным) наблюдениям. Нами было выполнено интегрирование с обоими начальным векторами состояния. Итог интегрирования — определение условий сближения астероида с Землей в 1858 и 2029 гг. Получена наиболее вероятная орбита. Для каждого из двух начальных условий построено семейство орбит в пределах ошибки и указано максимально и минимально возможные расстояния, на которые подойдет астероид.

Также рассмотрен вопрос прохождения астероида через спутники геостационарного пояса и «космический мусор», находящийся на той же орбите. Оценена вероятность столкновения со спутниками.

Список литературы

1. Шор В. А., Кочетова О. М., Заботин А. С. Сближение малой планеты (99942) Apophis = 2004 MN 4 с Землей в 2029 г. // «Астероидно-кометная опасность-2005»: Всерос. конф. «Астероидно-кометная опасность-2005» Санкт-Петербург, 3–7 окт. 2005. С. 134.

ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ОБЛАСТЕЙ МАССИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ,
СВЯЗАННЫХ С «ХОЛОДНЫМИ»
IRAS ИСТОЧНИКАМИ

С целью определения физических параметров проведено картирование 76 источников образования массивных звезд, связанных с IRAS источниками, в линиях излучения C^{18}O , ^{13}CO и CO . Представлены результаты обработки наблюдений 19 источников в линии C^{18}O ($J=1-0$). Проведены оценки расстояния до объектов кинематическим способом, для источников, расстояние до которых определено другим способом (фотометрическим, например), принято значение, имеющее наименьшую погрешность. В рамках приближения о локальном термодинамическом равновесии проведены оценки масс и средних плотностей. Диапазоны изменения физических параметров составили: линейные размеры — от 0.3 до 3.0 пк, M_{LTE} — от 200 до 21400 M_{\odot} , $n(\text{H}_2)$ — от $2 \cdot 10^3$ до $7.5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. Оценки масс M_{VIR} в приближении теоремы вириала варьируются от 100 до 7800 M_{\odot} . Отношение вириальных масс к массам LTE варьирует от 0.3 до 2.0 со средним 0.8 ± 0.1 . Пиковые температуры CO , которые можно принять как оценку кинетической температуры объектов, принимают значения от 13 до 45 К. Статистический анализ полученных данных выявил корреляции между массами и размерами ядер, концентрациями и размерами ядер, а также между ширинами линий и размерами ядер. Уравнения регрессии имеют вид:

$$\begin{aligned}\log(M_{\text{LTE}}) &= 1.96(0.15) \cdot \log(R) + 3.24(0.05), \quad p = 0.96, \\ \log(n(\text{H}_2)) &= -1.05(0.14) \cdot \log(R) + 0.79(0.05), \quad p = -0.87, \\ \log(\Delta V) &= 0.26(0.06) \cdot \log(R) + 0.37(0.02), \quad p = 0.67.\end{aligned}\quad (1)$$

Кроме того, произведено сравнение картированных источников с источниками из других ИК-каталогов и выявлены источники, имеющие значительные различия в положении максимумов излучения. Для сравнительного анализа будет произведено картирование части источников в линиях излучения других молекул.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 06-02-16317), а также программы ОФН РАН.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ИЗБЫТКА ЦВЕТА РЗС ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ 2MASS

Рассеянные звездные скопления (РЗС) — это важнейший источник информации о структуре и эволюции Галактики. Эта информация содержится в расстояниях и возрастах скоплений, которые нельзя получить, не зная поглощения света до скопления. Для однородности данных избытки цвета необходимо вычислять по единой программе.

Обычно избытки цвета ЗС определяют по данным оптических наблюдений в фотометрической системе UBV, но сейчас существует ИК-обзор неба, каталог 2MASS, данные которого можно использовать для определения параметров РЗС.

Нами написана программа для вычисления избытка цвета по этим данным. В ней используется метод совмещения главной последовательности РЗС со стандартной последовательностью непокрашенных звезд. В программе были реализованы несколько методов совмещения диаграмм. На первом шаге мы опробовали совмещение путем минимизации сумм квадратов отклонений; при этом квадрат отклонения каждой звезды домножался на вес этой звезды, вычисляемый согласно качеству наблюдательных данных. На основе полученных результатов построен график сравнения избытков цветов, вычисленных по программе и взятых из «Однородного каталога» АО УрГУ. Всего избытки цвета определялись для 46 РЗС. Вторую попытку мы сделали, заменив квадраты на степень, обратно пропорциональную числу звезд. Тем самым уменьшался вклад больших отклонений в конечный результат. После этого построен аналогичный график, в котором разброс точек оказался меньшим по сравнению с первым. Следующим шагом планируется учитывать в программе эволюционные уклонения, т. е. сделать возможным выбор стандартной последовательности в зависимости от приблизительного значения возраста скопления.

Основным выводом является то, что данные каталога 2MASS можно использовать для вычисления избытка цвета, и в дальнейшем программа будет доработана для вычисления модулей расстояний и возрастов скоплений.

**СРАВНЕНИЕ
ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ
НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЗЕМЛИ**

Для решения многих задач гравитационный потенциал Земли представляется рядом по сферическим функциям. Коэффициенты данного ряда можно определить различными способами. Чаще всего коэффициенты определяются из наблюдений положений искусственных спутников Земли и измерений силы гравитационного притяжения на поверхности Земли. На сегодняшний момент существуют различные модели гравитационного потенциала Земли, предоставляющие свои наборы гармонических коэффициентов, например, EGM96, PGM2000A, EIGEN. Цель данной работы — определить, существенны ли различия в параметрах доступных современных моделей. Для сравнения моделей в данной работе вычислялись нормы сферических функций отдельных порядков для всех моделей и разностей сферических функций одного порядка из разных моделей. Подобная оценка проводилась и для градиента гравитационного потенциала.

**ЗВЕЗДНЫЙ СОСТАВ
ГОЛУБОЙ КОМПАКТНОЙ
КАРЛИКОВОЙ ГАЛАКТИКИ SBS 1415+437**

Голубая компактная карликовая галактика SBS 1415+437 с низким содержанием тяжелых элементов ($Z \approx Z_{\odot}/20$) до недавнего времени рассматривалась кандидатом в молодые галактики. Используя архивные данные наблюдений, полученных на Космическом телескопе Хаббла, был проведен фотометрический анализ разрешенного звездного населения галактики. На полученных диаграммах цвет—звездная величина, которые достигают $\approx 29^m$ в V и I фильтрах, хорошо видна ветвь красных гигантов с возрастом звезд более 1—2 млрд лет. По точке обрыва ветви красных гигантов был найден модуль расстояния, равный $(m - M) = 30.66 \pm 0.12$, что соответствует расстоянию 13.5 ± 1.5 Мпк. Анализ пространственного распределения молодого населения свидетельствует о звездообразовании в последние 50 млн лет, распространяющемся вдоль тела галактики со скоростью ≈ 50 км/с.

Стеновые доклады

А. М. Занкович, И. Г. Коваленко

Волгоградский государственный университет

УСТОЙЧИВОСТЬ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ОСТАТКЕ СВЕРХНОВОЙ НА СЕДОВСКОЙ СТАДИИ: ТЕОРИЯ И ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Эксперименты по формированию сильной адиабатической ударной волны импульсом петаваттного фемтосекундного лазера в различных газовых средах (H, N, Ne, Ar, Xe) позволяют в лабораторных условиях моделировать расширение остатка сверхновой на ранней стадии пока, потери энергии на излучение остаются динамически незначительными. Обсуждаются причины расхождения результатов экспериментального моделирования неустойчивости ударной волны, теории и численного моделирования. Уточнены условия неустойчивости ударной волны с учетом исправления внутренних граничных условий, принятых в работах. В частности, показано, что отсутствует наблюдавшаяся в работе слабая неустойчивость течения относительно радиальных возмущений. Исследована также устойчивость ударной волны по отношению к внешним возмущениям. Показано, что ударная волна может усиливать возмущения, если она распространяется по турбулизованной межзвездной среде.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 04-02-96500).

П. Е. Захарова, Д. В. Гламазда, Г. Т. Кайзер,
Э. Д. Кузнецов, Ю. З. Вибе,
Л. К. Малышева, А. А. Попов
Астрономическая обсерватория УрГУ

ПОЗИЦИОННЫЕ ПЗС НАБЛЮДЕНИЯ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

В сентябре 2006 г. начались регулярные наблюдения геостационарных спутников (ГСС) на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории после его модернизации. На телескопе в прямом фокусе установлена ПЗС камера Alta U32 фирмы Apogee, демонтированы отдельные узлы оптической системы, установлены шаговые двигатели, датчики углов. В настоящее время поле зрения модернизированного комплекса составляет $61.2 \times 42.6'$. Служба времени организована на основе GPS приемника Acutime 2000. Предложены две методики наблюдений ГСС: наблюдения в спутниковом режиме (с выключенным астроприводом) и наблюдения в астрорежиме. Разработаны программы для управления телескопом и процессом наблюдений и программа для обработки ПЗС-снимков.

Осенью было проведено четыре сеанса наблюдений. В ходе обзорных наблюдений (21 сентября) в течение 8 ч получено около 500 ПЗС-снимков с экспозициями 10^8 . Во время других сеансов проводились наблюдения 18 ГСС по эфемеридам. В результате получены координаты ГСС, элементы предварительных и улучшенных орбит, спутники отождествлены с объектами Каталога ГСС. Среднеквадратичная ошибка редукции снимков, полученных в астрорежиме, составляет $0.3\text{--}0.7''$, а разности координат (О—С), полученные в процессе улучшения орбит, достигают $2\text{--}3''$. При астрометрической обработке снимков, полученных в астрорежиме, использовалась программа IZMCCD, разработанная в ГАО РАН.

Анализ результатов наблюдений свидетельствует о том, что на телескопе СБГ можно получать плотные ряды наблюдений ГСС для решения научных и научно-прикладных задач.

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОННЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ
НА ГИБРИДНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ УСТАНОВКЕ
ТЕЛЕСКОПА АЗТ-3 АО УРГУ**

В 2006 г. при проведении наблюдений геосинхронных спутников на гибридной телевизионной установке [1] телескопа АЗТ-3 Коуровской астрономической обсерватории УрГУ получено 326 положений для 85 объектов. Долготы подспутниковых точек наблюдаемых объектов лежат в диапазоне от 28 до 104°. Точность определения координат нормальных точек, получаемых в результате объединения наблюдений на интервале 10 мин, составляет 1–3'' для объектов с малыми наклонами орбит и малым суточным дрейфом, 1–5'' для объектов с большими наклонами и существенным дрейфом.

По данным наблюдений построены предварительные орбиты для 57 геосинхронных спутников. Выполнено улучшение орбит. Точность определения координат объектов, полученная по результатам улучшения орбит пассивных геосинхронных спутников, составляет 1–4'', причем ошибки определения координат быстро движущихся объектов в среднем выше. Выполнено отождествление наблюдаемых объектов с каталогом геосинхронных спутников. В дальнейшем улучшенные элементы орбит пассивных объектов планируется использовать для исследования особенностей стохастического движения геосинхронных спутников.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)»).

Список литературы

1. Крушинский В. В., Захарова П. Е., Кузнецов Э. Д. и др. Околоземная астрономия-2005: Сб. тр. конф. / Ред. Ю. А. Нефедьев, Л. В. Рыхлова, М. А. Смирнов, Е. С. Баканас. Казань: Казан. гос. ун-т, 2006. С. 247.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯДРА NGC 6334I И NGC 6334I(N)

Исследования гигантского молекулярного облака NGC 6334, проведенные на различных длинах волн, обнаруживают многочисленные очаги звездообразования. Два молекулярных ядра NGC 6334I и NGC 6334I(N), расположенных в северной части облака, предположительно находятся на разных стадиях эволюции. По данным каталога молекулярных спектральных линий [1], для молекулы CH_3OH в обоих ядрах проведены оценки физических условий методом вращательных диаграмм и неЛТР-моделированием. Модельные температуры коррелируют с вращательными температурами для обоих ядер. При этом ядро NGC 6334I(N) холоднее ядра NGC 6334I на ~ 30 К.

Лучевые концентрации, определенные методом вращательных диаграмм, практически совпадают для разных ядер. Проведенная оценка физических условий в молекулярных ядрах NGC 6334I и NGC 6334I(N) подтверждает, что они находятся на различных ранних стадиях эволюции молодых звездных объектов.

Список литературы

1. Калинина Н. Д., Соболев А. М., Салий С. В. и др. Каталог спектральных линий молекул в NGC 6334I и NGC 6334I(N) // Горизонты Вселенной: Тез. докл. на Всерос. астрон. конф. ВАК-2004: Тр. гос. астрон. ин-та. им. Штернберга. М., 2004. Т. LXXV. С. 153.

И. Г. Коваленко, А. Н. Колов, А. М. Занкович
Волгоградский государственный университет

ТУРБУЛЕНТНЫЕ МОДЕЛИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОЙ АККРЕЦИИ

Показано, что турбулентность существенным образом изменяет характер квазисферического аккреционного течения на черную дыру. Причиной служит появление вследствие возбуждения ненулевого удельного углового момента в турбулентном потоке эффективной «турбулентной» центробежной силы, тормозящей падение вещества. В отличие от ламинарной сферической аккреции Бонди разгон сверхзвукового турбулентного потока возможен только до некоторого конечного максимального числа Маха, после чего на малых радиусах поток замедляется до дозвукового. Результат подтверждается как расчетами в рамках развиваемой аналитической модели турбулентности, основывающейся на выводе уравнений газодинамики турбулентной среды из первых принципов при минимуме упрощающих гипотез, так и двумерными численными расчетами, демонстрирующими установление сильно анизотропной околосвуковой турбулентности с пульсирующими мелкомасштабными слабыми ударными волнами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-02-96611).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН ПРОФИЛЕЙ ПАРАМЕТРА СТОКСА

Для протонной вспышки балла 2В/4,8Х были построены гistogramмы эквивалентных ширин параметров Стокса WP для линий $H\alpha$ с центральным обращением и без него. Для обоих видов профилей линии $H\alpha$ распределение не показывает существенного различия между параметрами Стокса Q и U из-за симметричного расположения Q и U к направлению на центр солнечного диска. Обнаружено небольшое различие в распределении WP между линиями с центральным провалом и без него: большинство значений WP для линий с самообращением расположено в интервале 0.03—0.30, а для линий без центрального провала — в интервале –0.05—0.20.

ФОТОМЕТР ИК-ДИАПАЗОНА ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Методика регистрации ИК-излучения от астрономических объектов существенно отличается от используемой в оптическом диапазоне. Причиной тому является прежде всего атмосферное пропускание из-за, которого наземные ИК-наблюдения возможны только в определенных спектральных окнах атмосферной прозрачности, и тепловой фон атмосферы и элементов конструкции телескопа и фотометра, мощность которого может превышать на несколько порядков сигнал от исследуемых источников. Для выделения слабого сигнала из мощного атмосферного и инструментального фона используется пространственная модуляция диаграммы направленности телескопа.

Другой особенностью ИК-измерений являются малые размеры приемника излучения (0.5—1 мм), поэтому требуется специальная оптическая система для построения входного зрачка телескопа на приемнике. Как правило, используются сферические зеркала (полевые), которые не позволяют строить резкие изображения на приемнике.

В работе в качестве полевого предложено использовать тороидальное зеркало, которое строит входной зрачок телескопа на приемнике без астигматизма.

Приводятся результаты измерений пороговой чувствительности ИК-фотометра на лабораторном стенде.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЛАПСА МЕЖЗВЕЗДНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ

В рамках трехмерной геометрии с помощью МГД кода, основанного на методе гидродинамики сглаженных частиц (SPH) [1], исследуется коллапс межзвездных молекулярных облаков.

Масса облака $10^4 M_\odot$ выбрана на основе оценок предполагаемой массы среднего галактического протоскопления. Температура облака 100 К выбрана в согласии с наблюдениями для подобных облаков. Плотность, радиус, магнитное поле и угловая скорость вращения облака определяются заданием отношений тепловой, магнитной энергии и энергии вращения к модулю гравитационной ϵ_t , ϵ_m и ϵ_w . Значения данных величин всегда выбирались таким образом, чтобы облако было гравитационно неустойчивым.

На начальной стадии эволюции облака коллапс проходит сферически симметрично, центральная часть облака остается однородной. К моменту времени $0.9 t_{ff}$ в центре образуется диск, сжатие которого останавливает градиент давления вдоль оси Z . Если магнитное поле слабое, то градиент давления параллельный плоскости XY достаточно мал. Поэтому происходит осесимметричный коллапс центральной части диска. Формируется ударная волна, движущаяся наружу. В результате образуется кольцо, которое может фрагментироваться. В случае сильных магнитных полей магнитное поле работает как стабилизирующая сила. Если отношения энергий ϵ_t и ϵ_m близки, то радиус диска сохраняется, а плотность газа увеличивается. Наложения возмущений плотности в этом случае приводят к его фрагментации.

Список литературы

1. *Monaghan J. J.* Smoothed Particle Hydrodynamics // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1992. Vol. 30. P. 543.

Э. Д. Кузнецов¹, А. О. Кудрявцев²

¹Уральский государственный университет,

²Московский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ НЕУСТОЙЧИВЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ТОЧЕК ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

Особенности движения геосинхронных спутников исследовались на основе результатов численного моделирования. Для анализа стохастических свойств движения в окрестности неустойчивых стационарных точек с долготами 165 и 345° использованы карты начальных данных, соответствующих различным типам регулярных движений и квазислучайным решениям, на фазовой плоскости.

При построении карт использовалась программа разработанная в Институте прикладной математики и механики при Томском государственном университете. Моделирование движения геосинхронных спутников выполнялось с учетом основных возмущающих факторов: несферичности гравитационного поля Земли (модель EGM96, усеченная до гармоник 20-го порядка и степени), притяжения Луны и Солнца, приливов в теле Земли, прямого светового давления с эффектом тени Земли.

Интервал численного интегрирования составлял 30 лет. Начальные наклоны орбит спутников выбирались равными 0 и 10°. Для экваториальных спутников варьировалась начальная эпоха элементов орбит с целью оценки влияния лунно-солнечных возмущений на получаемые результаты.

Размеры зон квазислучайных решений лежат в пределах от десятых долей до нескольких градусов по долготе и от сотен метров до нескольких километров по большой полуоси. Выявлена слабая зависимость результатов от возмущений за счет светового давления при соответствующих реальным геостационарным объектам парусностям. Отмечено увеличение размеров областей перемежаемости регулярных и квазислучайных решений при росте парусности объектов. Уточнены положения по долготе неустойчивых стационарных точек для использованных начальных условий: 162 и 349°.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 06-02-16201).

ОСОБЕННОСТИ БЫСТРЫХ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В РАЗНЫХ ГРУППАХ

Быстрые колебания пятен или повороты за малые промежутки времени порядка 10–30 мин имеют очень разнообразный характер. В данной работе предпринята попытка выяснить, зависит ли характер колебаний от того, к какой группе относится пятно. Группы, в которых существуют солнечные пятна, делятся на три вида: одиночные, биполярные и мультиполярные. Рассмотрены особенности быстрых колебаний солнечных пятен для одиночного пятна и пятен в биполярной группе. Исследование проводилось по наблюдениям пятен в Коуровской обсерватории на телескопе АЦУ-5. Это видеосъемки солнечной группы в течение 5 с ежеминутно. Из каждой пятисекундной серии выбираются три самых лучших кадра, по которым определяется положение пятна относительно фиксированной линии и затем просматривается изменение этого положения. В нашем случае рассматривалось вращение в двух группах: одиночное пятно, наблюдавшееся в августе 2005 г., и биполярная группа, проходившая по диску Солнца в августе 2003 г. Эти пятна имеют примерно одинаковые размеры — около $50''$ по диаметру, наблюдались в течение нескольких дней сеансами по 2–4 ч. Из полученных результатов следует, что одиночное пятно постоянно колеблется с периодами 30–60 мин и амплитудой 5–7. Пятна в группе ведут себя спокойнее. У них наблюдается очень медленный поворот в одну сторону в течение 2–4 ч на 1–3° и на этом фоне изредка встречаются всплески с амплитудой 2–3° и периодом 15–20 мин. Следовательно, при изучении быстрых колебаний следует принимать во внимание, в какой группе находится исследуемое пятно.

**СРАВНЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН
ПРОФИЛЕЙ ПАРАМЕТРА СТОКСА В ЛИНИИ Н
С САМООБРАЩЕНИЕМ И В УСАХ**

Сравнение эквивалентных ширин профилей параметра Стокса WP проводилось отдельно для профилей линии с центральным провалом и для усов. В качестве аргумента выбирались две величины: максимальная интенсивность профиля линии I_{max} и отношение I_{max}/I_{min} . Таким образом, было построено четыре зависимости значений WP от I_{max} и WP от I_{max}/I_{min} . По профилям линии и параметров Стокса, полученным с помощью комплекса программ IDL, вычислялись значения WI и WP. Для получения WI и WP сумма значений I или R (всего 512 точек в каждом профиле) умножалась на шаг по длине волны 0.01958. Суммирование проводилось по программе MS Excel. Значения I_{max} и I_{min} брались из оригинальных профилей линии Н.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ НА ТИТАНЕ

Титан — самый крупный спутник Сатурна с радиусом 2575 км. Среднее расстояние от центра Сатурна 1.222×10^6 км; плотность 1.9 г/см³; масса 1.34×10^{26} г; гравитация составляет 1/7 часть земной; температура у поверхности -180°C . Благодаря низкой температуре спутник удерживает свою атмосферу. Атмосфера Титана в ~ 1.5 раза плотнее земной и состоит в основном из N и CH₄, а также H₂O и NH. Имеются свидетельства сохраняющейся активности недр Титана. Прежде всего это наличие в составе атмосферы CH₄ и радиогенного аргона. CH₄ в условиях атмосферы Титана под воздействием космического излучения испытывает тенденцию к распаду с отщеплением H, улетучивающегося в космос. Поэтому его присутствие в атмосфере в значительных количествах говорит о существовании постоянного привноса этого газа из недр планеты. Более того, на Титане обнаружены признаки современной вулканической активности. Наличие сохраняющейся активности недр Титана скорее всего обусловлено эффектом разогрева его недр за счет приливного трения при вращении по орбите вокруг Сатурна. В настоящее время неизвестен температурный профиль недр Титана, но можно оценить его диапазон. Оценки позволяют предположить, что зоны естественного углеводородного синтеза в условиях Титана в случае высокой активности недр (на уровне активности недр Земли) располагаются в его недрах на глубинах 7–9 км, тогда как в случае предельно низкой активности (уровень активности недр Марса) — на глубинах 105–140 км. В обоих случаях зоны естественного углеводородного синтеза располагаются в водной среде. Это делает возможным возникновение и современное существование в недрах Титана углеводородных форм «жизни», близких к тем земным формам, которые существуют в зонах глубоководных гидротерм. По крайней мере, по сравнению с ранее рассмотренными условиями возникновения и направлениями вероятной эволюции на Марсе и Юпитере формы «жизни» Титана должны быть нам более близки.

Т. П. Никифорова, С. В. Сукманова,
А. А. Калинин, А. И. Шагабутдинов
Астрономическая обсерватория УрГУ

ПРОБНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОТУБЕРАНЦЕВ В АО УРГУ С ПЗС-КАМЕРОЙ

В июле 2005 г. в АО УрГУ на солнечном телескопе АЦУ-5 в первом порядке дифракционного спектрографа АСП-20 с помощью ПЗС-камеры SXV-H9 StarlightXpress с разрешением $0.03 \text{ \AA}/\text{пиксел}$ проведены наблюдения эмиссионных линий в протуберанцах в широком диапазоне спектра (1083 нм HeI, ИК-триплет CaII, H_{α} , 587.5 нм HeI, H_{β} , H и K CaII).

Показано, что в случае хромосферно-активных линий использование неподвижного изображения центра диска Солнца в качестве стандартного источника для выравнивания поля матрицы (процедура «flat-field») нецелесообразно, поскольку в ядрах всех хромосферных линий обнаруживается остаточная эмиссия, обусловленная хромосферной сеткой. Для усреднения необходимо обеспечить быстрое движение изображения центра диска Солнца по щели спектрографа. Интерференцией во входном окне камеры при наклоне ее к оси спектрографа порядка 3° в УФ области ($\lambda < 450 \text{ нм}$) можно пренебречь.

Наиболее полные результаты получены для протуберанца, который наблюдался 18.07.05 в линии K CaII на северо-западном лимбе Солнца на периферии недавно скрывшейся за лимбом активной области AR 0786. Согласно ИПФ-изображению в линии H_{α} он состоял из двух петель малой яркости. Прослежено изменение параметров от центральных частей петель к их внешним частям. Из анализа формы контуров K CaII показано, что в центральных частях протуберанца основной причиной уширения является самопоглощение, причем оптические толщины не превосходят значения $\tau = 3.0$. Вычисленные населенности уровней линий K CaII соответствуют значениям температур $T_{ex} = 3400\text{--}6500 \text{ К}$, что характерно для холодных петель. Во внешних, наименее ярких частях петель выявляется четко выраженная многокомпонентная структура плазмы с минимальной доплеровской шириной 0.087 \AA .

А. А. Попов, И. С. Заложных, В. В. Крушинский
Уральский государственный университет

ПРОЕКТ 40-СМ ТЕЛЕСКОПА АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ УрГУ

В работе описывается проект 40-см телескопа Астрономической обсерватории Уральского государственного университета.

Приводятся расчеты оптики телескопа. Доказывается, что оптическая схема не только удовлетворяет самым жестким требованиям сегодняшнего дня, но и в дальнейшем не устареет, прежде всего при переходе к приемникам большего формата. Кроме того, возможно использование элементов оптики в качестве локального корректора.

Предлагаются алгоритмы управления телескопом с минимальным использованием вычислительных ресурсов центрального компьютера и способы их реализации. Приведены характеристики разработанных нами приводов и датчиков положения.

На телескопе предлагается установить следующие приборы: ПЗС-фотометр в фокусе Несмит 1, спектрограф низкого разрешения с редуктором светосилы в фокусе Несмит 2.

В настоящий момент идет изготовление оптики телескопа, в рамках проекта созданы шлифовально-полировальный станок и приборы контроля. Разработан и испытан привод телескопа на основе шаговых двигателей, позволяющий получить необходимую скорость и точность наведения. Проходит испытания электроника инкрементного энкодера, используемого в системе позиционирования телескопа.

АКТИВНЫЕ ИСЗ НА ГСО В ЗОНЕ 0—120 Е

В указанной зоне восточной долготы, близкой к области наблюдательных возможностей Коуровской обсерватории, проведена «инвентаризация» активных геостационарных и геосинхронных космических аппаратов (КА), срок активного существования которых еще не закончился. Данное исследование продолжает работу 2005 г. [1], представленную на прошлой конференции и включавшую только российские КА. За прошедший год в российской группировке на ГСО изменения небольшие: неожиданно вышел из строя, возможно столкнувшись с космическим мусором, КА «Экспресс АМ-11», находившийся в точке стояния 96.5 Е. Составлен каталог КА в указанной зоне, включающий общепринятое название; номер COSPAR; положение подспутниковой точки; информацию о базовой платформе, дающей представление о внешнем виде КА; срок активного существования; ссылку на литературу о КА. Сделано описание расположения КА и дана информация об их принадлежности. Отмечены группировки, относящиеся к России, международным организациям Intelsat, Eutelsat, Inmarsat, Meteosat. Исследованы подспутниковые точки группировок КА специального назначения. Изучено расположение КА, принадлежащих европейским странам, странам азиатского континента и другим странам, имеющим КА в указанной зоне. Каталог содержит информацию о 180 КА.

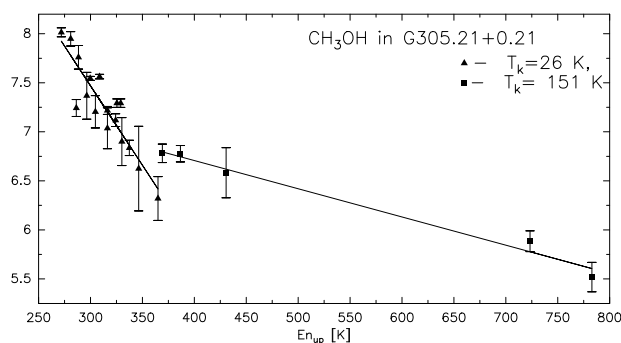
Список литературы

1. Ромашин Г. С. Российская группировка геостационарных спутников // Физика космоса: Тр. конф. Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та, 2006. С. 278.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В МОЛЕКУЛЯРНОМ ОБЛАКЕ G305.21+0.21 ПО КВАЗИТЕПЛОВЫМ ЛИНИЯМ МЕТАНОЛА

Объект G305.21+0.21 — область образования массивных звезд в южной части Галактической плоскости, удаленная от Солнца на 3.9 кпк. Наблюдательные данные, полученные на радиотелескопе SEST в 1997, свидетельствуют, что излучение CH_3OH возникает в районах, существенно различающихся по температуре. На вращательной диаграмме (см рисунок) выделяются 2 группы линий, имеющих вращательные температуры ~ 26 и ~ 151 К. Для исследования физических условий в соответствующих районах, проведено неЛТР-моделирование интенсивностей линий CH_3OH в приближении LVG.

Получено, что основное излучение в линиях, соответствующих переходам между низко-возбужденными уровнями, образуется в районе размером $\sim 9''$ с плотностью $\sim 5 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, температурой ~ 22 К и относительным обилием $\text{CH}_3\text{OH} \sim 1.5 \times 10^{-8}$. Оценка лучевой концентрации водорода для этого объекта составляет $\sim 6.5 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Полученные значения хорошо согласуются с результатами анализа вращательной диаграммы и оценками физических условий, проведенными по излучению других молекул (Walsh et al. 2006). Основное излучение на переходах между высоко-возбужденными уровнями возникает в компактном ($\sim 2.5''$) районе с температурой > 150 К.



РАВНОВЕСНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ СТРУЙНЫХ ВЫБРОСОВ ИЗ АКТИВНЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЯДЕР

Как показало проведенное нами численное нелинейное моделирование, формирующиеся в рамках самосогласованной постановки задачи струи оказываются существенно неравновесными. Используемая в [1] степенная модель гравитационного потенциала не совсем соответствует реальным распределениям. В особенности это относится к протяженным струйным выбросам, таким как в NGC 5252. Поэтому актуально построение более адекватной равновесной модели.

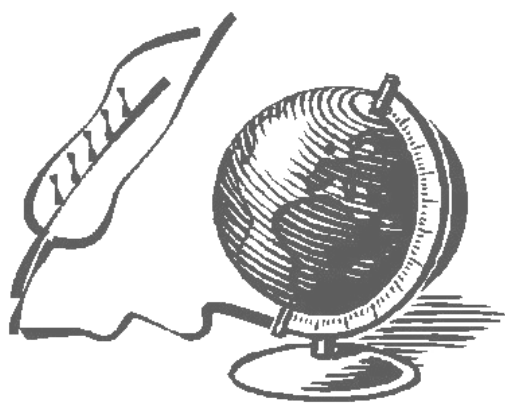
Простой, вполне приемлемой, но более реалистичной модели потенциала соответствует отвечающая кривой вращения $V_\varphi = V_{\varphi 0}\eta/(1 + \eta)$, где $V_{\varphi 0}$ — максимум кривой вращения (определяемой по звездам, т. е. без учета градиента газового давления); $\eta = r/r_0$, r — текущий радиус; r_0 — радиус края звездного балджа. Такой круговой скорости отвечает распределение гравитационного потенциала $\Psi = C_\Psi + V_{\varphi 0}^2[\ln(1 + \eta) + 1/(1 + \eta)] = C_\Psi + V_{\varphi 0}^2 f(\eta)$, где C_Ψ — постоянная, определяющая глубину потенциальной ямы, такую, что $\Psi(\infty) \rightarrow 0$.

При этом в рамках политропной модели $p = C\rho^n$, где C — нормировочная постоянная давления, определяемая из баланса на границе диска постоянного угла раствора с учетом центробежной силы, для покоящейся окружающей среды получаем $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \eta} = -\frac{nC}{n-1} \frac{\partial \rho^{n-1}}{\partial \eta} = \frac{\partial \Psi}{\partial \eta}$. Откуда $\rho = [(n-1)(-\Psi)/(nC)]^{1/(n-1)}$, $c_s^2 = C\gamma\rho^{n-1}$.

Список литературы

1. *Moiseev A. V., Afanasiev V. L., Dodonov S. N., et al.* // Preprint SISSA. Astro-ph/0006323. 2000.

Из истории науки



50 ЛЕТ КОСМИЧЕСКОЙ ЭРЫ

Почему для нас, детей Великой Отечественной войны, воспринимающих 9 мая 1945 г. как всенародный праздник, так значимы даты 4 октября 1957 г. и 12 апреля 1961 г.? Ответ может быть один: это дни, когда не только люди нашей страны, но и всего земного шара были объединены общечеловеческой идеей.

Глядя на небо, человек мечтал о дерзновенном и захватывающем полете к звездам. Сегодня мы являемся свидетелями осуществления чаяний многих поколений. Вот уже 50 лет в околоземном пространстве движутся искусственные спутники Земли, космические аппараты, а просторы Солнечной системы бороздят межпланетные станции — небесные тела, созданные руками землян.

Начало космической эры в истории человечества положено запуском в СССР 4 октября 1957 г. первого в мире искусственного спутника Земли (ИСЗ).

Трудно описать драматизм и восхищение, связанные с запуском первого ИСЗ, а сегодня предстоящий юбилей дает повод вспомнить историю космонавтики, проследить некоторые вехи ее развития.

Как это было?

Кто впервые употребил слово «спутник»? Кто сумел рассмотреть в пороховой ракете прообраз могучих космических кораблей будущего, открывающего человечеству путь к звездам?

Наш соотечественник, учитель арифметики и геометрии К. Э. Циолковский, еще в 1883 г. в работе «Свободное пространство» дал описание корабля с реактивным двигателем, а в 1895 г. написал научно-фантастическую повесть «Грезы о Земле и небе». Циолковский первый получил уравнения космического полета, первый высказал идею, легшую в основу создания современных жидкостных ракет. Это было в 1898 г.

Надо заметить, что Циолковский высоко оценил проект воздухоплавательного аппарата Н. И. Кибальчича и поставил этого ученого на первое место в ряду своих предшественников.

В первые десятилетия XX столетия во Франции, США, Германии, Советском Союзе появляются теоретические исследования в области освоения космического пространства. Так, в 1924 г. в СССР было создано первое в мире Общество изучения межпланетных сообщений, практическая деятельность которого свелась к публичным лекциям и докладам. Оно просуществовало недолго, но значение его работы для отечественной астронавтики несомненно.

Не на пустом месте в начале 30-х гг. возник легендарный ГИРД (Группа изучения реактивного движения) или, как в шутку тогда называли, «группа инженеров, работающих даром». В ГИРД на общественных началах объединились многие энтузиасты ракетного дела. Здесь никто не ждал никаких материальных благ. Тут не было ничего, кроме интересной работы. Вела сюда только романтическая тяга к необыкновенному.

Кто же составлял основу ГИРД? Блестящий эрудированный инженер Ф. А. Цандер, талантливый организатор, впоследствии Главный конструктор ракетно-космических систем С. И. Королев, выдающиеся инженеры М. К. Тихонравов, Ю. А. Победоносцев и др. Один из блестящих продолжателей дела К. Э. Циолковского, С. П. Королев считал себя его учеником. Впоследствии Королев так отзывался о встрече с Циолковским: «Константин Эдуардович потряс нас своей верой в возможность космоплавания. Я ушел от него с одной мыслью — строить ракеты и летать на них. Всем смыслом моей жизни стало одно — пробиться к звездам».

В августе 1933 г. была запущена первая советская жидкостная ракета «ГИРД-09».

В конце 1933 г. в результате слияния ГИРД и Ленинградской газодинамической лаборатории, где в 1930–1933 гг. В. П. Глушко был создан первый жидкостный реактивный двигатель, образован Реактивный научно-исследовательский институт, в котором и зародился наш спутник.

В 1948 г. М. К. Тихонравов предложил создать эскадру из ракет Р-1 (ракетная эскадра — идея Циолковского) и с ее помощью запустить первый ИСЗ. В этом же году Тихонравовым был представлен доклад об искусственном спутнике Земли на научной сессии Академии артиллерийских наук. Для абсолютного большинства людей тема доклада казалась фантастической.

В декабре 1948 г. было объявлено о первых планах США вывести на земную орбиту искусственный спутник Земли. В 1955 г. вновь последовали сообщения о намерении США запустить ИСЗ.

В июле 1957 г. от президента Эйзенхауэра стало официально известно, что США активно ведут подготовку запуска спутника (его название «Луна Эйзенхауэра»). Никто тогда не сомневался в твердом намерении и возможностях этой страны осуществить задуманное.

В январе 1956 г. Королев объясняет руководству страны, что с созданной ракетой Р-7 СССР может обогнать американцев с запуском первого ИСЗ. 30 января 1956 г. было подписано Постановление СМ СССР о создании в 1957–1958 гг. искусственного спутника Земли (спутник называли «Объект Д»). Поскольку «Объект Д» — это целая научная лаборатория, а сроки изготовления аппаратуры срывались, Королев и Тихонравов решили срочно изготовить ПС — простейший спутник.

21 августа 1957 г. состоялся успешный запуск первой в мире межконтинентальной баллистической ракеты. Ее последняя ступень пролетела выше 6 000 км и опустилась в заданном районе. Создатель ракеты С. П. Королев понимал, что это открывает дорогу в космос.

Часы показывали 22 ч 28 мин по московскому времени 4 октября 1957 г., когда был запущен первый спутник. Шли первые минуты эры Космоса, в которую вступила наша планета.

Люди планеты, говорящие на разных языках, с воодушевлением произносили по-русски: «Спутник, спутник!».

Космос — для человека

...После запуска первого ИСЗ в околоземное пространство были направлены второй и третий спутники. Это были настоящие научные лаборатории в Космосе.

В первые десять лет космической эры создавалось множество разных типов космических аппаратов. Были запущены спутники связи, метеорологические спутники, сфотографирована обратная сторона Луны, совершена мягкая посадка на ее поверхность, начались полеты к Венере, Марсу. Среди этого разнообразия направлений выделялось одно — пилотируемые полеты.

12 апреля 1961 г. на космическом корабле «Восток» первым вышел на бесконечную дорогу к звездам Ю. А. Гагарин. Вскоре после этого регулярными стали полеты двух- и трехместных кораблей.

Академик Б. В. Раушенбах назвал это первое десятилетие спортивно-романтическим. Главной задачей было проникнуть в неизведанное, увидеть то, чего еще никто не видел.

Еще один шаг в космическое будущее сделан в 1969 г. — на поверхность Луны впервые ступила нога человека. Это был американский астронавт Нил Армстронг.

Интересно, что для полета американских астронавтов на Луну авторы программы «Аполлон», разрабатывая лунную трассу, выбрали проект, созданный еще в 30-е гг. русским конструктором и изобретателем Юрием Кондратьевым.

Вслед за Советским Союзом на космические трассы самостоятельно вышли другие страны: в 1958 г. — США, в 1962 г. — Англия, в 1965 г. — Франция, в 1970 г. — Япония и Китай и т. д.

Драматична история открытия радиационных поясов Земли. Уже на втором ИСЗ, запущенном в космос 4 ноября 1957 г., были проведены первые измерения потоков космических лучей за атмосферой Земли. В мае 1958 г. на третьем ИСЗ был установлен более совершенный прибор. С помощью этой аппаратуры советскими учеными во главе с С. Н. Верновым и А. Е. Чудаковым был открыт внешний радиационный пояс Земли.

Однако первое сообщение об открытии зоны радиации высокой интенсивности, окружающей Землю, поступило в мае 1958 г. от американской группы исследователей, возглавляемой Дж. Ван Алленом. В дальнейшем эта область получила название внутреннего радиационного пояса Земли.

Следующие три десятилетия космической эры носят уже совсем иной характер. По выражению Б. В. Раушенбаха, космонавтика стала «взрослой», каждая программа должна была иметь теперь солидное обоснование.

Уникальные научные результаты получены в ходе реализации проектов наблюдательной внеатмосферной астрономии: космический телескоп им. Хаббла, астрометрический спутник «Hipparcos», солнечно-гелиосферная обсерватория «SOHO», астрофизические лаборатории, работающие в инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском, гамма-диапазонах спектра.

Благодаря полетам космических аппаратов наши знания о планетах достигли уровня, который был немыслим до космической эры. Международное сотрудничество обеспечивает одновременную реализацию более десятка исследовательских проектов. В путешествии к Меркурию находится аппарат «Мессенджер». Станция «Венера-Экспресс» выполняет исследования на орбите вокруг Венеры. На орбите Марса функционирует целая флотилия космических аппаратов, а на его поверхности два марсохода работают уже более мар-

сианского года. Космический аппарат «Галилей» успешно выполнил программу исследований системы Юпитера. Станция «Кассини» работает в системе Сатурна, а спускаемый аппарат «Гюйгенс» передал уникальные сведения о Титане и его атмосфере. На пути к Плутону и объектам пояса Койпера находится космический аппарат «Новые горизонты».

Осуществляется программа уникальных экспериментов по изучению малых тел Солнечной системы. С пролетной траектории исследована комета Галлея с помощью советских станций «Вега-1» и «Вега-2», европейского аппарата «Джотто» и др. Космический аппарат «Дип импакт» выполнил активный эксперимент над ядром кометы Темпеля-1. В экспедиции «Розетта» предполагается осуществить посадку на ядро кометы Чурюмова-Герасименко. Аппарат NEAR исследовал астероид Эрос и совершил посадку на его поверхность. Японские специалисты с помощью станции «Хаябуса» пытаются доставить на Землю образцы вещества астероида Итокава. Завершены эксперименты по доставке на Землю межзвездных частиц и частиц солнечного ветра, а также образцов кометного вещества.

Сегодня большинство искусственных спутников Земли выполняет не только полезную, но часто — необходимую для человечества работу. Спутники связи соединяют континенты единой глобальной телевизионной, радио- и телефонной связью. Люди уже не замечают повседневной работы метеорологических и навигационных спутников. Космос прочно вошел в нашу жизнь.

Метеорологические спутники решили проблему краткосрочных прогнозов погоды, оперативно давая картину распределения облачных масс и атмосферных потоков по всей Земле. Однако отсутствие адекватной глобальной модели климата пока не позволяет существенно повысить результаты прогнозирования.

Глобальные навигационные спутниковые системы — американская «GPS» и отечественная «ГЛОНАСС» — обеспечивают определение положения абонента с точностью до нескольких метров. В настоящее время начата отработка элементов европейской навигационной системы «Gallileo».

С 1982 г. вступила в действие глобальная оперативная система поиска и спасения «КОСПАС-САРСАТ» (СССР, США, Канада, Франция). Такая система значительно повышает эффективность проведения спасательных операций морской и авиационной поисково-спасательных служб.

Область применения данных дистанционного зондирования Земли из Космоса значительно расширяется. Задачи оперативного спутникового контроля природных ресурсов, исследование динамики протекания природных процессов и явлений, анализ причин, прогнозирование возможных последствий и выбор способов предупреждения чрезвычайных ситуаций являются сегодня очень серьезным методом сбора информации о состоянии интересующей территории, необходимым для принятия правильных управленческих решений.

Информация дистанционного зондирования уже сегодня используется при инвентаризации сельскохозяйственных угодий, прогнозировании урожаев, в геологоразведочных задачах, наблюдении за ростом городов, изучении океанских ресурсов и выявлении источников загрязнения океана, контроле лесных угодий и водных ресурсов, мониторинге чрезвычайных ситуаций и решении многих других задач.

Одной из первостепенных целей космических исследований является задача защиты окружающей среды, защиты экосистемы планеты. В истории цивилизации еще не приходилось сталкиваться со столь сложной задачей, требующей вовлечения крупномасштабных финансовых потоков выработки и развития технологий самого высокого уровня, где в качестве базовых могут рассматриваться космические технологии. Специфика космического полета — невесомость и глубокий вакуум — обеспечивает получение уникальных материалов, изготовление которых невозможно в земных условиях.

А какова же будущая роль пилотируемых полетов? Подготовка к межпланетным и межзвездным полетам. Земля — колыбель человечества, но стремление к познаниям и путешествиям — основа развития нашей цивилизации.

Первый спутник и развитие астрономии на Урале

1 июля 1957 г. началось проведение Международного геофизического года. Впервые более 50 государств объединились для совместных исследований в атмосфере, на морях, океанах, суше. Этот год оказался еще и годом максимума солнечной активности.

Возрождение астрономии в Уральском университете началось с запуска первого ИСЗ.

Август и сентябрь 1957 г. протекали в напряженной работе. Клавдия Александровна Бархатова, посвятившая всю свою жизнь развитию астрономии на Урале, Веслав Юлианович Скульский, Рудольф

Павлович Михайлов и около 50 студентов УрГУ, педагогического института занимались организацией станции для визуальных наблюдений будущего искусственного спутника Земли.

Было много трудностей, ведь все было впервые. Ежедневно проводились тренировки, в оптические трубки АТ-1 наблюдали звезды, самолеты, проверяли радиоаппаратуру.

12 сентября 1957 г. наша станция рапортовала АН СССР о своей готовности, а в конце сентября Астрономическим советом АН СССР была организована «генеральная проверка» станций. Все понимали, что момент запуска очень близок. Волнение нарастало. Никто не знал, когда, и неизвестно было, какая страна первой запустит спутник.

5 октября газеты сообщили о запуске первого искусственного спутника Земли. Из астрономического кабинета никто не уходил. В 21 ч 10 мин местного времени была получена телеграмма из Москвы о том, что 6 октября в 5 ч 11 мин московского времени в северной части меридиана Свердловска на высоте 67° необходимо наблюдать спутник. Ровно в 2 ч ночи в Нижнем Исетске, в 12 км от города, было установлено 30 оптических трубок, но из-за сплошной облачности наблюдения не проводились.

Спутник увидели только 11 октября. Эфемериды, присылаемые из Москвы, были настолько грубыми, что приходилось выставлять «барьеры» из нескольких десятков наблюдательных трубок с перекрытием поля зрения поперек траектории движения спутника. Кто-нибудь увидит... Спутника ждали часами.

Удачные наблюдения были 12, 16 октября, — и началась работа. Приходили телеграммы из Астросовета АН СССР. Адрес был необычный: «Свердловск, Небо, Бархатовой» и подпись: «Космос».

Приходили и благодарности. Наши наблюдения помогали уточнить последующие эфемериды. Была даже переданная через Астросовет благодарность из США — за наблюдения американского спутника.

Свердловская станция наблюдения ИСЗ получила номер 1045. Наблюдательная площадка станции располагалась в те дни на крыше 6-этажного здания университета (ул. 8 Марта, 62).

Первые фотографические наблюдения ИСЗ начались в марте 1958 г. на фотокамере с фокусным расстоянием 21 см, на пленке шириной 19 см, чувствительностью 600 единиц ГОСТ.

Борьба за точность наблюдений шла постоянно. От Академии наук было получено новое оборудование: биноклярные зенитные ко-

мандирские трубы ТЗК, а позднее — БМТ. Наша станция вошла в число двадцати станций, оборудованных специальной фотографической камерой НАФА Зс/25.

Невозможно перечислить здесь всех наблюдателей, чей самоотверженный труд служил возрождению астрономии на Урале.

Богатый опыт свердловчан в наблюдении спутников сыграл важную роль в возрождении кафедры астрономии и геодезии в Уральском университете, оказался определяющим в принятии решения о строительстве Астрономической обсерватории на Урале.

Кафедра астрономии и геодезии УрГУ была восстановлена зимой 1960 г., — началась вторая ее жизнь. В это же время открыта и астрономическая специальность на физико-математическом факультете УрГУ с возможностью подготовки специалистов по астрономии в количестве 25 человек.

Станция наблюдений ИСЗ переехала на учебную обсерваторию (Обсерваторская горка), возведенную руками сотрудников и студентов, а в 1965 г. была построена и введена в строй Коуровская астрономическая обсерватория — единственная научная обсерватория на Урале. Наряду с развитием звездной астрономии, астрофизики этой обсерватории предстояло продолжить и наблюдения за спутниками.

В Коуровке первым был установлен звездный телескоп АЗТ-3, затем — солнечный и, наконец, в 1974 г. монтажники из Йены установили цейссовскую спутниковую камеру СБГ.

Как не похожа деятельность современного отдела искусственных спутников Земли на примитивные самоотверженные наблюдения первых ИСЗ. Серьезнейшая научная работа, основанная на позиционных наблюдениях геостационарных спутников, исследования по теории движения ИСЗ, изучение особенностей стохастического движения геосинхронных спутников. Введение в строй оптико-электронного комплекса на телескопе АЗТ-3 позволило автоматизировать процесс наблюдений геосинхронных спутников и существенно повысить оперативность получения точных положений объектов. В настоящее время на телескопе АЗТ-3 введена в строй новая гибридная телевизионная система, существенно повысившая качество получаемого наблюдательного материала. Выполнен большой комплекс работ по модернизации телескопа СБГ: в первичном фокусе размещена ПЗС-камера Alta U32 (производство фирмы Апогей, США), на телескопе установлены шаговые двигатели и датчики углов. Это поз-

волило на основе пейссовского телескопа СБГ создать автоматизированную квантово-оптическую систему для наблюдений космических объектов.

Сегодня Коуровская обсерватория УрГУ — региональный астрономический научно-образовательный центр. Она успешно развивается, ведет активную научную и образовательную деятельность.

В 1996 г. решением Международного астрономического союза малой планете № 4964 было присвоено имя Коуровка. Это признание заслуг Коуровской обсерватории мировым астрономическим сообществом, которая, как сказано в свидетельстве, «является Меккой для студентов-астрономов России».

Т. И. Левитская¹, М. Н. Начапкин²

¹Уральский государственный университет,

²Российский профессионально-педагогический университет

**«ПРОБИТЬСЯ К ЗВЕЗДАМ!»
(К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ГЛАВНОГО
КОНСТРУКТОРА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ
СИСТЕМ С. П. КОРОЛЕВА)**

В 2007 г. отмечается 100 лет со дня рождения академика Сергея Павловича Королева и 50-летие со дня запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ). Первые ИСЗ, первый вымпел Советского Союза, доставленный на Луну, первые фотографии обратной стороны Луны, первый полет Ю. А. Гагарина и последующие пилотируемые полеты в космос были восторженно восприняты всем человечеством. Имя Главного конструктора С. П. Королева стало известно лишь после его смерти в январе 1966 г. Как отмечал Президент АН СССР академик М. В. Келдыш, «Наша страна и вся мировая наука в лице академика Сергея Павловича Королева имела ученого, с именем которого навсегда было связано одно из величайших завоеваний науки и техники всех времен — открытие эры освоения человечеством космического пространства». Однако и сегодня о личности Генерального конструктора, к сожалению, мало известно молодому поколению.

Чтобы быть первопроходцем в таком трудном и сложном деле, как освоение космоса, требовались не только гигантские материальные затраты, но и в первую очередь талантливые ученые и инженеры. Жизнь Королева представляет собой пример удивительной целеустремленности, неукротимой силы человеческого духа, способной преодолеть любые испытания. Он имел перед собой ясную цель и в минуты жизненных невзгод никогда не падал духом, не терял самообладания, оптимизма и воли к борьбе. Его называли одержимым, он отдавал делу всего себя, без остатка. Выдающиеся организаторские

© Т. И. Левитская, М. Н. Начапкин, 2007

способности и талант большого ученого позволили ему на протяжении ряда лет направлять работу многих научно-исследовательских и конструкторских коллективов на решение больших комплексных задач.

Описанию жизни и творчества Королева посвящен ряд работ. А. П. Романов, автор первых репортажей с космодрома Байконур, опубликовал в 1966 г. книгу «Конструктор космических кораблей». Он несколько раз встречался и беседовал с Сергеем Павловичем: «Каждая встреча, беседа с академиком С. П. Королевым приносила радость общения. Поражала широта проблем, которые решал ученый, покоряла его горячая вера в беспредельные возможности человека, в то, что освоение космоса принесет людям благо и счастье». В своей книге Романов рассказывает о жизни и деятельности Главного конструктора, прослеживает путь развития советской космонавтики от первых жидкостных ракет в 30-х гг. до 60-х гг. К сожалению, по цензурным причинам в ней ничего не было сказано о крайне тяжелом периоде в жизни Сергея Павловича — аресте и работе в колымских лагерях. Взаимоотношениям Королева и Гагарина посвящена одна из повестей книги В. С. Губарева «Серебристые облака». Наиболее полным исследованием жизни и научной деятельности Королева является выпущенная в 1994 г. книга известного журналиста Я. К. Голованова «Королев: факты и мифы». В 1998 г. в США издана книга американского историка и журналиста Харфорта «Королев». В капитальном труде ученого из исторического департамента НАСА Азифа А. Сиддики, целиком посвященном истории советской космонавтики, дана объективная оценка вклада Королева в развитие ракетно-космических систем. В 2002 г. в издательстве «Наука» вышла книга Н. С. Королевой, дочери Сергея Павловича, «Отец», в которой были описаны многие, неизвестные ранее факты его биографии.

Королев родился перед 1907 г., 30 декабря (12 января 1907 г. по новому стилю), в городе Житомире в семье преподавателя гимназии Павла Яковлевича Королева и его жены Марии Николаевны Москаленко. Вскоре семья переехала в Нежин. Самым ярким событием его нежинской жизни явился полет летчика Уточкина летом 1910 г. Ярослав Голованов так передал ощущения маленького Сережи, наблюдающего полет аэроплана: «Это было самое фантастическое, са-

мое невероятное зрелище за всю его маленькую жизнь. Именно в эти минуты пережил он тот высший восторг, граничащий с предельным страхом, почти ужасом, восторг, охватывающий и душу, и тело».

В годы Гражданской войны Сережа жил с родителями в Одессе. С июля 1922 по 16 августа 1924 г. он учился в стройпрофшколе № 1. Сережа, как и многие подростки, увлекался яхтами и ходил под парусом от Одессы до Николаева, Херсона и крымских берегов. Большой интерес юноша проявлял к гидросамолетам М-9 Черноморского флота. Для него эти летающие лодки были чудом, сказочным порождением двух стихий — неба и моря. Желание полетать на гидросамолете стало для него навязчивой идеей. Надо иметь в виду, что все эти события происходили в 1923 г., когда было создано общество друзей воздушного флота (ОДВФ) и лозунг «Даешь крылья!» был главным лозунгом. За 12 месяцев 1923 г. число членов общества увеличилось с 12 000 до 1 000 000 человек. Таким образом, этот общественный энтузиазм усиливал интерес Королева к небу, самолетам.

Для Сергея была характерна жажда знаний и необычайная целеустремленность. Он много читает в этот период, знакомится с книгами К. Э. Циолковского «Аэроплан, или Птицеподобная летательная машина», Отто Лилиенталя «Полет птиц как основа летательного искусства». Начинает также активно заниматься немецким языком, чтобы в подлиннике читать книги о самолетах. Будучи учеником школы, Сергей читает лекции на предприятиях Одессы по «ликвидации аэробезграмотности». Зимой 1923 г. у него возникает план построить планер. Уже в этой первой конструкторской работе проявляются такие качества характера Королева, как редчайшее, фанатическое упорство, умение подчинить всю свою жизнь поставленной цели. Первый планер был построен и назван «К-5», а его создатель принимает решение — учиться строить аэропланы и летать на них.

С 1924 по 1926 г. Королев учился в Киевском политехническом институте. Жизнь студента была тяжелой. Как имеющий «непролетарское происхождение», он должен был платить за учебу в институте сорок рублей в год. Чтобы выжить, ему приходилось разгружать мешки с сахаром, вставать в пять часов утра и разносить газеты. Он даже работал помощником машиниста на паровозе. При этом всегда находились люди, готовые попрекнуть его «интеллигентностью», а принципиальные технические споры подменить рассуждениями о его классовой ущербности. Несмотря на большие жизненные трудности,

Сергей не забывал своей главной цели — создание летательных аппаратов, дела, которому он решил посвятить всю свою жизнь. Он понимал необходимость получения качественного, разностороннего образования.

В 1926 г. Королев поступает в Московское высшее техническое училище (МВТУ), авиационные достижения которого были хорошо известны. С 1872 г. в училище работал Н. Е. Жуковский, в 1902 г. была введена в действие одна из первых в мире аэродинамических труб. Вводную лекцию студентам, среди которых был и Королев, прочитал А. Н. Туполев, а позднее Г. Н. Мусинянц, К. А. Ушаков, Б. С. Стечкин стали учителями Королева. Он начинает активно работать в АКНЕЖЕ — академическом кружке им. Н. Е. Жуковского. Весной 1927 г. Королев вместе с Саввой Кричевским начинает строить авиетку — легкий самолет. Его строительство продолжалось около четырех лет. В газете «Вечерняя Москва» за 2 апреля 1931 г. в разделе «Новости авиации» были помещены фотография самолета и сообщение, что известным инженером С. П. Королевым, которому не было тогда и двадцати трех лет, был спроектирован и построен тип легкого двухместного самолета «СК-4». В мае 1927 г. Сергей Павлович стал работать конструктором на авиазаводе № 22 в Филях.

Большой практической школой для Королева стало участие во Всесоюзных планерных соревнованиях. Впервые он приехал на четвертые соревнования, которые состоялись в сентябре 1927 г. в Коктебеле. На Шестых Всесоюзных планерных соревнованиях (6—23 октября 1929 г.) Сергей попадает в аварию. Но, несмотря на это, он не падает духом, о чем свидетельствуют строки из его письма, адресованные матери: «Наутро приказ: я вылетаю на своей машине сам! Все идет прекрасно... и кажется, первый раз в жизни чувствую колоссальное удовлетворение... Разве не наибольшее удовлетворение и награда самому летать на своей машине?! Ради этого можно забыть все, и целую вереницу бессонных ночей, дней, потраченных в упорной работе без отдыха, без передышки...» В журнале «Авиация и Химия» отмечалось, что 15 октября 1929 г. молодой «паритель» Королев на планере «Коктебель» парил 4 ч 19 мин. 2 ноября 1929 г. Сергей получил пилотское свидетельство, которым всю жизнь очень гордился. Оно давало ему право совершать полеты на всех видах планеров. В 1930 г. он получил удостоверение и пилота самолета. 9 февраля 1930 г. Королев окончил аэромеханический факультет МВТУ и ему была присвоена квалификация инженера-аэромеханика.

Интерес к ракетному двигателю возник у Сергея еще в 1929 г. Решающую роль в выборе этого направления исследований имела его встреча с К. Э. Циолковским в Калуге в 1929 г. Он вспоминал: «Одно из ярких воспоминаний жизни — это встреча с Константином Эдуардовичем Циолковским... Шел 1929 г. Мне было тогда что-то около двадцати трех. Вместе с друзьями мы уже в то время увлекались планеризмом, самолетостроением, разрабатывали собственные небольшие конструкции... Приехали мы в Калугу утром. В деревянном доме встретил нас высокий старик в темном костюме. В руках у него был слуховой аппарат в виде рупора из жести... Запомнились удивительно ясные глаза. Говорил Циолковский энергично, обстоятельно. Минут за тридцать он изложил нам суть своих взглядов. Не ручаюсь за точность сказанного, но запомнилась мне одна фраза. Когда я, с присущей молодости горячностью, заявил, что отныне моя цель — пробиться к звездам, Циолковский улыбнулся и сказал: "Это очень трудное дело, молодой человек, поверьте мне, старику. Это потребует знаний, настойчивости, терпения и, быть может, всей жизни..." — "Я не боюсь трудностей", — ответил я тогда. — "Ну, вот и отлично. Начните с того, что перечитайте все мои работы, которые вам необходимо знать на первых порах... Я всегда готов вам помочь"». Свою первую книгу, вышедшую в 1934 г., «Ракетный полет в стратосфере. Сентябрь 1934 г.», Сергей подарил своему учителю, К. Э. Циолковскому.

Королев, познакомившись с трудами К. Э. Циолковского, «... жил одной мыслью: строить ракеты и летать на них. Это стало всем смыслом... жизни». Но прошло еще два года глубокого изучения советской и зарубежной литературы, прежде чем он непосредственно приступил к проектированию ракетных двигателей. Ярослав Голованов считал, что именно осенью 1931 г. Королев начал активно заниматься самолетами и ракетными двигателями. Он прекрасно понимал, что реактивный двигатель, поставленный на самолет, резко увеличит его скорость и соответственно боевые возможности машины. В это время Сергей вместе с Фридрихом Цандером и Борисом Черановским занимались установкой ракетного двигателя на бесхвостом планере Черановского.

Советское правительство понимало перспективность создания ракетных двигателей. Центральный совет Осоавиахима в 1931 г. создает научно-исследовательский центр «Группа изучения реактивного движения» (ГИРД). В 1932 г. Королев был назначен начальником ГИРД. Именно в 1932–1933 гг. он становится крупным специалистом

в области ракетной техники. Одной из первых его конструкторских работ является ракетоплан БИЧ-11 (1932). Модель планера была сравнительно небольшой: длина 3.1 м, размах крыла 12.1 м. Весил он всего 200 кг. Одновременно он работал вместе с М. Н. Тихонравовым над созданием первой советской ракеты на жидком топливе. Она была успешно испытана 17 августа 1933 г. и, как признавал потом Королев, «эта удача заставила всех нас окончательно, твердо поверить в свои силы...»

25 сентября 1933 г. началось формирование Реактивного научно-исследовательского института (РНИИ). Сергей Павлович был назначен сначала заместителем директора по научной части, а затем руководителем конструкторского бюро. Фактически с 1934 г. Королев становится в институте лидером всех работ по крылатым ракетам и ракетопланам. Он вел сразу несколько научных тем: в 1933—1936 гг. работал над жидкостной крылатой ракетой «216», а также создавал ракетный беспилотный самолет «212». Этот экспериментальный ракетный беспилотный самолет класса «земля—земля» с реактивным двигателем «ОРМ-65» был самой большой из всех ракет, созданных Королевым до войны. Это был цельнометаллический моноплан со среднерасположенным крылом трапецевидной формы. Его длина была более 3 м и весил он 210 кг. Согласно его расчетам эта крылатая ракета должна была нести полезный груз — 30 кг взрывчатки — на расстояние 50 км. Стартовала ракета «212» с помощью пороховой ракетной катапульты с рельсового пути. Испытания беспилотного самолета были неудачными, и это дало возможность органам госбезопасности обвинить Сергея Павловича во вредительстве с целью ослабления военной мощи СССР.

Королев был арестован 27 июня 1938 г. с обвинением по 58-й статье. Добиваясь признательных показаний, следователи на Лубянке подвергали его пыткам и издевательствам, сломали ему челюсти. Однако Королев не признал себя виновным и пытался доказать, что никогда не был членом контрреволюционной вредительской организации. Тем не менее за участие в «антисоветской террористической и диверсионно-вредительской троцкистской организации» Сергей Павлович был приговорен к десяти годам тюремного заключения. В августе 1939 г. Королева привезли на Колыму на прииск Мадьяк. Добывая золото, ему пришлось работать и под землей. Распорядок дня в лагере был жестким: в четыре часа — подъем. Завтрак — кусочек селедки, двести граммов хлеба и чай. Работа начиналась с семи и шла до двух часов дня, когда привозили обед: миску баланды с пер-

ловкой и триста граммов хлеба. Зэки думали о еде все время. Сергей Павлович с тревогой ждал суровой зимы. При этом он не смирился со своей участью. В письме Верховному прокурору СССР 15 октября 1939 г. он писал: «Вот уже 15 месяцев, как я оторван от моей любимой работы, которая заполняла всю мою жизнь и была ее содержанием и целью. Я мечтал создать для СССР впервые в технике сверхскоростные высотные ракетные самолеты, являющиеся сейчас мощным оружием и средством обороны. Прошу Вас пересмотреть мое дело и снять с меня тяжелые обвинения, в которых я совершенно не виноват». В Москве мать и жена Королева тоже стали хлопотать о пересмотре дела. Пленум Верховного суда 13 июня 1939 г. отменил приговор Военной коллегии от 27 сентября 1938 г. Дело Королева было направлено на новое расследование, и позднее осенью 1939 г. Сергея Павловича вызвали в Москву. Это было для него спасением, так как зиму на колымском прииске он бы не выдержал (из 500 заключенных на руднике до весны дожили не более 100 человек).

Находясь в Москве, Королев продолжает борьбу за свою полную реабилитацию. В письме И. В. Сталину от 13 июля 1940 г. он просит назначить новое объективное следствие по его делу, пишет, что его волнуют интересы безопасности страны, которые могут пострадать в этой области из-за отставания от развитых западных держав. Письмо дошло до адресата, и Королев стал работать в КБ Туполева, на авиазаводах Омска и Казани. Главной задачей Королева была разработка конструкции ракетных ускорителей для авиации. В 1942 г. он закончил работу «Введение к вопросу о самолете — перехватчике РП с реактивным двигателем РД-1». В Казани Королев испытывал жидкостные ракетные ускорители для бомбардировщика ПЕ-2. Истребитель ЛА-120 с его ракетным ускорителем развил фантастическую для того времени скорость — 805 км/ч. Все это время он считался подследственным. Лишь 27 июля 1944 г. вышел указ Президиума Верховного Совета СССР о снятии с него судимости.

Как признанный специалист по ракетной технике, Сергей Павлович в конце 1945 г. был командирован в Германию. Целью поездки являлось изучение германской ракетной техники, в частности ракеты ФАУ-2. Следует отметить, что германские разработки в этой области тогда считались передовыми в мире. Советские специалисты разыскивали по всей стране документацию, специалистов и уцелевшие детали ракет. Все собранное эшелонами отправлялось в СССР. В Германии Королев присутствовал на демонстрационных испытаниях ракеты ФАУ-2, устроенных английскими специалистами. В 1946 г.

он был назначен главным конструктором изделия «№ 1» — копии немецкой ракеты ФАУ-2. К июлю 1947 г. Сергей Павлович сумел собрать из разных деталей несколько ракет ФАУ-2. Для их испытаний осенью 1947 г. был построен полигон Капустин Яр. Первый старт ракеты на полигоне состоялся 18 октября 1947 г. в 10 ч 47 мин. Примерно через минуту после старта баллистическая ракета поднялась на высоту 23 км, затем — на 63 км и начала падать. Ракета пролетела расстояние 274 км, что было первым успехом. Всего же с 18 октября по 13 ноября было проведено 11 пусков ФАУ-2. В марте 1948 г. уже была готова советская модификация ракеты ФАУ-2 — Р-1. 9 марта 1948 г. состоялась встреча Королева со Сталиным. Вождь интересовался работой над новыми ракетами, высказывал свое мнение по вопросу о том, какие ракеты нужны СССР. Сталин считал, что стране не нужны ракеты, подобные ФАУ-2, из-за ее малой дальности, так как потенциальный противник находится на расстоянии нескольких тысяч километров. Поэтому конструкторы должны работать над созданием ракет большого радиуса действия. В 1949 г. Сергей Павлович сделал доклад на защите эскизного проекта ракеты Р-3. Дальность ее составляла 3000 км, а стартовый вес 72 т. По сравнению с ФАУ-2 (12 т) она казалась гигантской ракетой.

Взлет Королева был стремительным. Летом 1956 г. вчерашний эск, член-корреспондент Академии наук СССР становится Главным конструктором ведущего конструкторского бюро страны — ОКБ-1. Лишь в апреле 1957 г., когда шла подготовка к запуску первого спутника, Королев был реабилитирован. Важно отметить, что, разрабатывая мощное оружие, он не забывал и о научных целях. Начиная с 1954 г. Сергей Павлович ставит перед советским правительством и Академией наук СССР вопрос о необходимости использования ракеты-носителя для выхода в космос. В годовом отчете Академии наук СССР он пишет: «В настоящее время все более близким и реальным кажется создание искусственного спутника земли и ракетного корабля для полетов человека на большие высоты и для исследования межпланетного пространства». Молодой конструктор Н. А. Кутыркин 25 ноября 1956 г. получил задание на проектирование простейшего спутника.

В жизни Королева 1957 г. стал поистине звездным. Долгожданные летные испытания разработанной под руководством Сергея Павловича первой в мире межконтинентальной ракеты «Р-7» начались 15 мая 1957 г. Ракета «Р-7» — главный итог земных трудов Королева и начало его космических дел. В ней были сконцентрированы все до-

стижения современной науки и техники. Это была мощная ракета с чрезвычайно высокими летными характеристиками и конструктивным совершенством. Первые пуски «семерки» оказались неудачными, но 21 августа 1957 г. ракета без замечаний прошла по заданной траектории и поразила цель на Камчатке. В специальном сообщении ТАСС от 27 августа 1957 г. говорилось: «На днях осуществлен запуск сверхдальней межконтинентальной многоступенчатой ракеты». Таким образом, в августе 1957 г. СССР получил непревзойденное средство доставки ядерных боезарядов на территорию вероятного противника. Это грандиозное событие нашло отклик во всем мире. Интеллектуальным и организационным центром громадной кооперации, обеспечившей успех, являлся Совет главных конструкторов, работавших над основными системами и агрегатами ракеты: двигателями, системами управления, наземным оборудованием. В его состав входили В. П. Бармин, В. П. Глушко, В. И. Кузнецов, Н. А. Пилюгин, М. С. Рязанский. Возглавлял совет Королев, объединивший действия ученых и конструкторов, направлявший их работу к достижению единой цели — созданию баллистических, а затем и космических ракет.

Первые старты «семерки» ознаменовали и рождение нового полигона. Стартовые комплексы в Капустинном Яре были пригодны для пусков на расстояние не более 1,5 тыс. км. Дальность же ракеты «Р-7» превышала 8 тыс. км. Новый полигон начали строить около железнодорожной станции Тюратам Кызыл-Ордынской области Казахской ССР. День 2 июня 1955 г., когда были определены штаты и структура полигона, получившего позднее название «Космодром Байконур», с той поры считается датой его основания. После 1991 г. Байконур оказался за границей, и России приходится его арендовать у Казахстана. Работы проводились масштабные. Только на площадке № 2 (будущий гагаринский старт) к апрелю 1956 г. отрыли и вывезли миллион кубометров грунта. Одному из авторов этих строк пришлось служить два года на Байконуре, в городе Ленинске. Приходилось проезжать и через знаменитый гагаринский старт — «двойку». До сих пор он поражает своими размерами. На площадке как историческая реликвия сохраняется небольшой дощатый домик, в котором провел ночь перед стартом с 11 на 12 апреля 1961 г. первый космонавт Вселенной.

Подлинным триумфом Королева как конструктора оказался исторический день 4 октября 1957 г. В 22 ч 28 мин московского времени с космодрома Байконур была запущена ракета-носитель «Р-7» с пер-

вым в мире искусственным спутником Земли. Спутник имел форму шара диаметром 58 см и весом 83.6 кг. Его радиосигналы «бип-бип» сразу же слышали в различных точках Земли. Это был выдающийся успех, но, по воспоминаниям очевидцев, даже участники пуска не предполагали, какой гигантский резонанс он получит в мире. В октябрьском номере журнала «Пари матч» говорилось: «Русские только что достигли того, что американцы столь часто и преждевременно описывали: запустили первый искусственный спутник Земли. Это было чудо... Рухнула догма о техническом превосходстве Соединенных Штатов».

Первый искусственный спутник Земли был только началом великого дела. Наука по праву считает 1959 г. эпохальным в деле освоения Луны. Первая автоматическая станция, стартовавшая в сторону Луны 2 января 1959 г., во время своего путешествия собрала уникальный научный материал и стала первым искусственным телом Солнечной системы. Автоматическая станция «Луна-2», стартовавшая 14 сентября 1959 г., доставила на поверхность Луны в район моря Ясности сферический вымпел с гербом Советского Союза. 7 октября 1959 г. космическая ракета вывела на орбиту автоматическую станцию «Луна-3». С расстояния 60—70 тыс. км были впервые сделаны снимки невидимой с Земли части Луны. В 1960 г. Королев утвердил основные положения по созданию первого пилотируемого космического корабля, разработанного по его инициативе и под его руководством. В том же году произошла его встреча с первым отрядом летчиков-космонавтов, приступившим к подготовке к полетам в космос. Среди претендентов на первый космический полет был Ю. А. Гагарин. Леонов вспоминал, что расположение к Юрию — простому русскому парню Смоленщины — возникло у Главного конструктора с первой встречи. Показывая летчикам космический корабль, Королев предложил занять место в кабине любому желающему. Юрий, быстро сняв обувь, легко забрался в кабину. Несмотря на небольшие размеры, она ему понравилась, а Королева покорило уважительное отношение Юрия к технике, его непосредственность, основательность и целеустремленность. Как член Государственной комиссии и технический руководитель, Королев 12 апреля 1961 г. дает разрешение на первый в истории полет человека в космическое пространство. Общая длина ракеты-носителя «Восток» — трехступенчатого комплекса, состоящего из шести блоков, — достигала почти 40 м. Длина первой ступени ракеты (примыкает к центральному блоку) 19 м, второй ступени (центрального блока) 28 м. Длина

третьей ступени вместе с обтекателем, под которым помещен космический корабль, 10 м. Шесть жидкостных ракетных двигателей давали полезную суммарную мощность в полете в пределах 20 млн лошадиных сил. Юрий Гагарин облетел Землю за 108 мин и впервые увидел ее из космоса. Развитие космонавтики шло очень быстро. Менее чем через четыре месяца после полета Гагарина Герман Титов увеличивает время пребывания в космосе до 25 ч. В 1962 г. Королев готовит и проводит первый групповой полет кораблей «Восток-3» и «Восток-4», пилотируемых Андрианом Николаевым и Павлом Поповичем, участвует в запуске автоматической межпланетной станции «Марс-1». С деятельностью Королева связана подготовка в 1963 г. полета первой женщины в космос: проводится второй групповой полет кораблей «Восток-5» и «Восток-6», пилотируемых Валерием Быковским и Валентиной Терешковой. С целью дальнейшего изучения космического пространства и отработки техники дальних межпланетных космических полетов с 1964 г. стали запускаться автоматические межпланетные станции «Зонд». Королев был убежден в необходимости освоения планет Солнечной системы. Он считал, что одна из важнейших целей космонавтики состоит в том, чтобы лучше познать окружающую нас Вселенную и саму Землю. Учитывая ограниченность природных ресурсов Земли, Королев уже в 60-е гг. размышлял о возможном использовании ресурсов небесных тел.

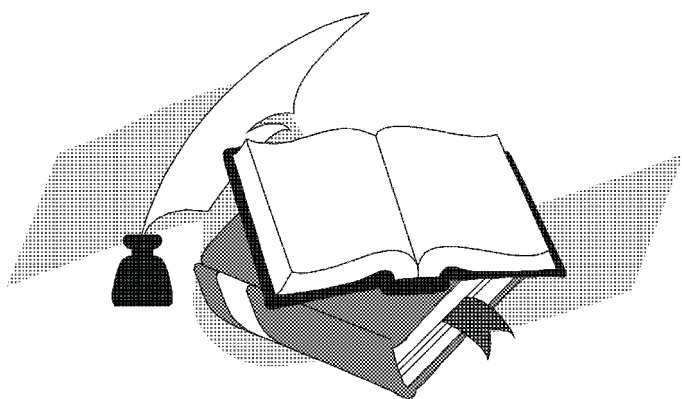
Ярослав Голованов в своей книге отмечает: «Почему Королев будет интересовать наших потомков?.. Его жизнь вместила две революции, две мировые войны, каторгу, тюрьму и великую безликую славу. Пройти все это, сохранив свое "я", не отступаясь от мечты, которая настигла тебя в юные годы, способен только уникальный характер, достойный самого пристального изучения... Я вообще не вижу в нашей послереволюционной истории другого человека, который сделал бы для славы России, для поднятия его всемирного авторитета, для демонстрации ее упорства, воли и многогранных талантов столько, сколько сделал Королев». Имя Сергея Павловича Королева навсегда вошло в историю человеческой цивилизации.

Список литературы

1. *Королева Н. С.* Отец: В двух книгах. М., 2002.
2. *Романов А. П.* Конструктор космических кораблей. М., 1981.
3. *Романов А. П.* Королев. М., 1990.

4. *Губарев В. С.* Серебристые облака: Повести о космонавтах и тех, кто всегда остается на Земле. М., 1982.
5. *Голованов Я. К.* Королев: факты и мифы. М., 1994.

Литературные страницы



* * *

Урания, светлейшая из мудрых,
И ты, стокий Аргус, страж полночный
Сокровищницы драгоценных тайн,
И ты, о Вечность эфемерной жизни,
Сегодня перед вами я клянусь:

Быть честным пред собой, как пред Вселенной,
Хранить огонь, зажженный вами в сердце,
И с тьмою мужественно биться за него
Оружием науки дерзновенной,
Быть воином, искателем, поэтом,
Но не от мира отрешившимся аскетом.

А если я нарушу эту клятву,
Да не найти мне в этом мире смысла,
Той светлой искры интереса к жизни,
Что поднимает нас над Хаосом Безликим.

Все будет так! Я в этом вам клянусь!

Н. Д. Калинина
Астрономическая обсерватория УрГУ

Б. М. Шустову — 60

Как будто на салазках юбилей
Скатился вдруг с невидимой вершины.
И «Аргусом стоглазым»
Душа смутила разум,
Мудро усмехнувшись: «Не жалей...»

Комичен человека хлипкий век
В сравнении с космичностью желаний.
Но вот какая штука —
Коль двигаешь науку,
С годами вкусно ускоряешь бег.

Где мальчик из Уральского гнезда?
И девочка с улыбкою Джоконды?
Урании клянутся —
С Вселенной разберутся!
Да светит им попутная звезда...

10.01.2007

* * *

Опять открываю я Зимнюю Школу,
Шестнадцатый раз подряд!
Здесь никогда не бывает раскола,
Здесь каждый друг другу рад.

И пусть летят метеором года,
И новые лица кругом.
Школа с тобой уже навсегда,
Как добрый, надежный дом.

НОВОГОДНИЙ ВИХРЬ

Летя во мгле по эллипсу орбиты,
Земля зимою ускоряет ход
И, отмеряя календарный год,
На краткий миг включает все софиты!

Стучат Часы на башне, деловиты,
Метель заводит снежный хоровод,
И Ель-Царица в окруженье свиты
Нацелена ракетой — в полет...

Догматы однородности Пространства
И Времени не трогают умы,
И без высокомерия и чванства
Уже всему готовы верить мы!

Мы верим в бредни Дедушки-Мороза,
И в искренность Снегурочкиных слов,
Сама Яга, вещунья и стервоза,
Старейшая из жертв анабиоза,
Разгадывает смыслы наших снов!

Кикиморы нам елку украшают
И топят баньку добрый Домовой
(А черти угли кочергой мешают!..),
Нам совы вслед кивают головой,
И зайцы — на капусту приглашают...

Летит Земля в оснеженном эфире,
Мелькают звезд хрустальные огни...
Все ближе полночь. Мы одни в квартире,
И кажется, что в мире мы — одни!

И кажется весь мир таким уютным,
Таким пушистым, добрым, молодым,
Что забываешь, как сегодня утром
Твой зуб сверкал отнюдь не перламутром,
И ты хандрил, ершистым был и мутным,
Прикидывался старым и больным:

Скрипел сустав, пошаливало сердце,
Стучало в пятках, ёкало в боку,
На частоте повышенной (в два герца!)
То в дрожь тебя бросало, то — в тоску...

Но... загудели древние куранты,
Шампанское рванулось в потолок,
Печаль-тоска отбросила платок
И встала (балериной!) на пуанты!..
И полетела... Взмах руки... Прыжок!
Держи ее за талию, дружок,
Лети, кружись, лови цветы и фанты!

Мы вновь — юны! Мы — гении, таланты!
Наш горизонт — невиданно широк!..

О, сладостное пламя вдохновенья,
Во льдах, в снегах зажженный костерок!
О, магия свеченья и горенья:
Разлеты искр, порывы, завихренья!..

Как нам сберечь твой жаркий уголек,
Чтоб он пылал не час и не денек,
Но целый год, до нового Рожденья?!

...Несет Земля по эллипсу орбиты
Змеящийся, блестящий серпантин,
И мы — кружимся, музыкой обвиты,
В единый вихрь душой и телом слиты,
По зазеркальной плоскости скользим!..

ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

По данным современной космологии, более 70 % всей энергии-массы Вселенной приходится на долю так называемой «темной энергии». 25 % составляет «темная материя», или скрытая масса. И только менее 5 % — обычное барионное вещество, состоящее из известных нам элементарных частиц и составленных из них атомов и молекул, электромагнитное излучение которых мы можем наблюдать. Два последних вида материи (скрытая масса и обычное вещество) подчиняются закону всемирного тяготения. А вот «темная энергия» действует как антигравитация, раздувая Вселенную и обеспечивая ее ускоренное расширение в масштабах миллиардов световых лет.

Потаенно,
В жажде неизменной
Силу тяготенья превозмочь
Темная Энергия Вселенной
Век от века набирает мощь!

И летят, иных не зная практик,
В пустоту, в неведомое, в ночь
Жаркие соцветия галактик,
Удаляясь друг от друга прочь!

Звезды отгорают, рассыпаясь
Искрами на плазменных ветрах,
Солнцами из праха возрождаясь,
Вновь покорно обращаясь в прах...

...Давит нас вселенской боли мука:
Видно, в мире, что ни говори! —
Побеждает Темная Разлука
Силу притяжения Любви!

...Лишь в одном находим утешенье:
В том масштабе, что для сердца мил,
Теснота земного притяженья
Превышает действие всех сил!

ЭНТРОПИЯ

Мгновенье цени, Афродита!
А Вечность пускай подождет.
Ракушки излом иль гранита,
На всем увяданья налёт...
О чем Энтропия поёт?
Как больно стрела ее жжет...
Но Чаша еще не допита!

СЛЕПОТА

Мне кажется — давно тебя я знал,
Река судьбы играла и бурлила,
Но отыскала правильный причал...
На той горе, что нас соединила,
Слепой ашуг струной своей бренчал,
Он даже свет и тьму не различал...
И ты меня на время ослепила!..

ПОИСК

Истина — в вине...
Или в тумане,
Результат неведом наперед,
И слепым верблюдом в караване
В забвенье, в безмыслии, в нирване
Нехотя Познание бредёт
Где, когда Руно свое найдёт
Аргонавт, храпящий на диване?..

РУКОПИСЬ

Рукопись — бессмертна. Это знает
Каждый, кто Булгакова читал,
И сгорев, она не пропадает,
Если ее Мастер написал.

Если полуночною порою
Дух Святой над ней прошелестел,
Если автор не кривил душою
Под мертвящим взглядом азazel...

Если Слово жизнь преображает,
Изменяет правила игры,
Рукопись горит, но не сгорает,
Просто... исчезает до поры.

Воск свечи — наплывами на блюде,
Край стола — как темная вода...

Рукописи в мире остаются,
Мастера уходят навсегда...

Список участников

ФИО	Организация	E-mail
Аввакумова Е. А.	УрГУ	e.snegireva@gmail.com
Алексеев И. Ю.	КрАО	ilya@crao.crimea.ua
Алексейчук Р. А.	ВолГУ	investigation@list.ru
Артюшкова М. Е.	МГУ	wox96@mail.ru
Балуев Р. В.	СПбГУ	roman@astro.spbu.ru
Бартунов О. С.	ГАИШ	oleg@sai.msu.ru
Батурин А. П.	НИИ ПММ ТГУ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Бикмаев И. Ф.	КГУ	Ifan.Bikmaev@ksu.ru
Бордовицына Т. В.	ТГУ	tvbord@sibmail.com
Борич А. А.	УрГУ	anna1988d@mail.ru
Бочанцев В. В.	УрГУ	vbochantsev@mail.ru
Бритаевский Н. Э.	ОНУ	brit_va@rambler.ru
Бурданов А. Ю.	УрГУ	artburd@rambler.ru
Бутенко М. А.	ВолГУ	Masha_@list.ru
Быкова Л. Е.	НИИ ПММ ТГУ	le@mail.tomsknet.ru
Васюнин А. И.	УрГУ	vasyunin@mail.ru
Васюнина Т. С.	МРІА	cassiopeia_tanya@mail.ru
Веледина А. В.	СПбГУ	astrosasha@gmail.com
Вибе Д. З.	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вибе Ю. З.	УрГУ	Julia.Wibe@usu.ru
Виноградова Н. С.	УрГУ	astrometr@infoteck.ru
Виноградова А. Б.	КГУ	patsan_@rambler.ru
Вторушина М. А.	БГУ	liliya @bsu.ru
Галеев А. И.	КГУ	almaz@ksu.ru
Галушина Т. Ю.	НИИ ПММ ТГУ	volna@sibmail.com
Гламазда Д. В.	УрГУ	Dmitriy.Glamazda@usu.ru
Грачев Д. А.	МГУ	gdmath@mail.ru
Гусев А. С.	ГАИШ МГУ	gusev@sai.msu.ru
Даниленко А. А.	СПбГПУ	danila@astro.ioffe.ru
Додин А. В.	ГАИШ МГУ	dodin_nv@mail.ru
Доржиев Ж. В.	БГУ	lilya@bsu.ru
Дремова Г. Н.	РФЯЦ—ВНИИТФ	g.n.dryomova@mail.ru
Есипов В. Ф.	ГАИШ МГУ	esipov@sai.msu.ru
Железнов Н. Б.	ИПА РАН	znb@ipa.nw.ru
Загреддинов Р. Р.	КГУ	rz@bk.ru
Заложных И. С.	УрГУ	ivan.zalozhnih@gmail.com
Занкович А. М.	ВолГУ	zed81@list.ru

ФИО	Организация	E-mail
Захарова П. Е.	УрГУ	Polina.Zakharova@usu.ru
Зинченко И. И.	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Зубарева А. М.	КГУ	zam_01@rambler.ru
Зюзин Д. А.	СПбГПУ	dima_zyuz@mail.ru
Иванова Д. В.	КГУ	Diana.Ivanova@ksu.ru
Искалина М. С.	УрГУ	Iskalina@mail.ru
Казанцев М. Б.	ГОУ ВПО ЧелГУ	kazant@csu.ru
Кайзер Г. Т.	УрГУ	Galina.Kajzer@usu.ru
Калинин А. А.	АО УрГУ	Aleksandr.Kalinin@usu.ru
Калинина Н. Д.	АО УрГУ	Nataliya.Kalinina@usu.ru
Кирсанова М. С.	ИНАСАН	m.kirsanova@mail.ru
Клеткина В. С.	КГУ	chernecova.tatya@mail.ru
Коваленко И. Г.	ВолГУ	igk@vlink.ru
Коваль В. В.	РГУ	litlevera@rambler.ru
Кожевников В. П.	АО УрГУ	valerij.kozhevnikov@usu.ru
Кожевников Д. Н.	БГУ	liliya @ bsu.ru
Кожевникова А. В.	АО УрГУ	kozhevnikova-a@yandex.ru
Колов А. Н.	ВолГУ	kolovan@mail.ru
Кононов Д. А.	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru
Коробцев И. В.	ИСЗФ СО РАН	korobtsev@yandex.ru
Костогрыз Н. М.	ГАО НАНУ	kosn@mao.kiev.ua
Кочеров А. В.	ЧелГУ	kocherov@csu.ru
Кривошеев Ю. М.	ИКИ РАН	krivosheev@iki.rssi.ru
Крушинский В. В.	УрГУ	krussh@gmail.com
Кудрявцев А. О.	МГУ	kudryavtsev@fds-net.ru
Кузнецов Э. Д.	УрГУ	Eduard.Kuznetsov@usu.ru
Курбатов Е. П.	ИНАСАН	kurbatov@inasan.ru
Левитская Т. И.	УрГУ	Tatyana.Levitskaya@usu.ru
Лямова Г. В.	АО УрГУ	obser@uraltc.ru
Макаренко Н. Г.	ГАО РАН	ng-makar@mail.ru
Малафеев С. Ю.	ННГУ	malafeev_s@mail.ru
Малыгин Д. А.	БГУ	liliya@bsu.ru
Мальшева Л. К.	АО УрГУ	lk-malysheva@yandex.ru
Марсаков В. А.	РГУ	marsakov@mail.ru
Мартынова А. И.	СПбГЛТА	vor@astro.spbu.ru
Мартынов К. А.	ИПФ РАН	mcal@appl.sci-nnov.ru
Митрошина М. М.	БГУ	liliya@bsu.ru
Мусцовой В. В.	ВолГУ	sasha_semenuk@mail.ru
Насонов Д. С.	ГАИШ МГУ	gvard@sai.msu.ru
Начапкин М. Н.	РГППУ	Nachapkin@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Никифорова Т. П.	АО УрГУ	Tatyana.Nikiforova@usu.ru
Орлов В. В.	СПбГУ	vor@astro.spbu.ru
Островский А. Б.	УрГУ	Andrei.Ostrovskii@usu.ru
Отто И. П.	БГУ	liliya@bsu.ru
Панкратова Н. В.	УрГУ	silver-star@yandex.ru
Пирогов Л. Е.	ИПФ РАН	pirogov@appl.sci-nnov.ru
Поздина К. А.	УрГУ	ksushka_n@mail.ru
Поляков А. М.	УрГУ	coi@bk.ru
Попов А. А.	УрГУ	apopov66@gmail.com
Попова М. Э.	АО УрГУ	Maria.Popova@usu.ru
Прохоров М. Е.	ГАИШ	mike@sai.msu.ru
Пуланова А. Ф.	УрГУ	AnnGeo@dez.com
Рамазанова Г. Р.	УрГУ	gyzialsneg@gmail.com
Ромашин Г. С.	УрГУ	georgij.romashin@usu.ru
Салий С. В.	АО УрГУ	Svetlana.Salii@usu.ru
Сахибуллин Н. А.	КГУ	Nail.Sakhibullin@ksu.ru
Свечников М. А.	УрГУ	g.n.dryomova@mail.ru
Свинкин Д. С.	СПбГПУ	svinkin@mail.ioffe.ru
Селезнев А. Ф.	АО УрГУ	anton@dt.ru
Семенцов В. Н.	ГАИШ МГУ	valera@sai.msu.ru
Семенюк А. И.	ВолГУ	sasha_semenuk@mail.ru
Сильченко О. К.	ГАИШ МГУ	olga@sai.msu.su
Смирнов Е. А.	СПбГУ	smirik@gmail.com
Смирнов А. А.	СПбГУ	l_smirnoff@mail.ru
Соболев А. М.	УрГУ	Andrey.Sobolev@usu.ru
Соколов Д. Д.	МГУ	sokoloff@dds.srcc.msu.su
Соловьев А. А.	ГАО РАН	solov@gao.spb.ru
Старенькая Е. А.	УрГУ	steeperslope@mail.ru
Степанищев А. С.	СПбГУ	m02sas@star.math.spbu.ru
Стрижова Д. А.	УрГУ	dasha_st@mail.ru
Сукманова С. В.	АО УрГУ	Tatyana.Nikiforova@usu.ru
Токовенко А. А.	ОАО	tonich_83@mail.ru
Томассон М.	OSO	magnus@oso.chalmers.se
Троицкий Н. Р.	ИПФ РАН	troitsky@appl.sci-nnov.ru
Троянский В. В.	ОНУ	VovanVT@yandex.ru
Тудупова М. М.	ТГУ	sulime@sibmail.com
Хабибуллина М. Л.	КГУ	r56@rambler.ru
Хамагаев С. Т.	БГУ	liliya@bsu.ru
Хекерт П. А.	УЗК	heckert@wcu.edu
Холшевников К. В.	АИ СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru

ФИО	Организация	E-mail
Хоперсков С. А.	ВолГУ	khoperskov@vlink.ru
Храмцова М. С.	УрГУ	mshramcova@gmail.com
Храпов С. С.	ВолГУ	sasha_semenuk@mail.ru
Чернецова Т. А.	КГУ	chernecova.tatya@mail.ru
Чухарева К. В.	УрГУ	kapadastr@inbox.ru
Шагабутдинов А. И.	АО УрГУ	Aleksandr.Kalinin@usu.ru
Шайдулин В. Ш.	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шаповалов М. В.	РГУ	cva-zag@mail.ru
Шелемей О. В.	УрГУ	oksana.shelemei@mail.ru
Шиманский В. В.	КГУ	Slava.Shimansky@ksu.ru
Шолойко А. Н.	БГУ	liliya@bsu.ru
Шустов Б. М.	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru
Юханссон Л. Е.	OSO	leb@oso.chalmers.se
Якобчук Т. Н.	ГАО НАНУ	yakobchuk@mao.kiev.ua
V V.	M. G. U.	vvinuv@iucaa.ernet.in

Содержание

Программа конференции	5
Обзорные лекции	19
Бордовицына Т. В. Космический мусор. Образование и динамическая эволюция	19
Вибе Д. З. Протопланетные диски	35
Гусев А. С. Поверхностная фотометрия галактик: цели и методы	45
Зинченко И. И. Радиоастрономия завтрашнего дня	60
Макаренко Н. Г. Нелинейные методы прогноза временных рядов	68
Марсаков В. А. Звезды внегалактического происхождения в гало Галактики	70
Орлов В. В., Мартынова А. И. Проблема трех тел в небесной механике и астрофизике	84
Прохоров М. Е., Бартунов О. С. Виртуальные обсерватории	103
Сильченко О. К. Эволюционный синтез интегрального излучения галактик	113
Соболев А. М. Молекулы в истечениях из массивных молодых звездных объектов	128
Соколов Д. Д. Циклическая активность Солнца и звезд и динамоволны	129
Соловьев А. А. Природа солнечных пятен: современные наблюдения и модель	139
Холщевников К. В., Кузнецов Э. Д. Орбитальная эволюция Солнечной системы	142
Шустов Б. М. Галактики и межгалактическая среда: механизмы эволюционных взаимосвязей	180
Тезисы студенческих докладов	199
Бритаевский Н. Э. Прогноз времени существования низкоорбитальных космических объектов	199
Бутенко М. А. Свойства семейств периодических орбит в галактическом звездном баре	200
Веледина А. В. Эволюция спектра излучения при комптоновском рассеянии	201
Вторушина М. А. Исследование хромосферы Солнца по фильтраграммам КCaII	202
Грачев Д. А., Артюшкова М. Е. Распространение света во Вселенной с пространственными неоднородностями	203
Даниленко А. А., Зюзин Д. А., Свинкин Д. С. Геометрия столкновения двух сверхзвуковых потоков и морфология туманностей вокруг быстро движущихся нейтронных звезд	204

Доржиев Ж. В. Исследование короткоживущих мелкомасштабных магнитных арок по наблюдениям верхней атмосферы в линии He 10830 Å	205
Загретдинов Р. Р. Планирование спутниковых геодезических измерений, цели и методы	206
Зубарева А. М. Спектроскопия и многоцветная фотометрия поляра MT Dra (RX J1846.9+5538)	207
Коваль В. В. Зависимости параметров эллипсоидов скоростей F-G-звезд тонкого диска от возраста	208
Кривошеев Ю. М. Расчет комптонизации спектра излучения методом Монте-Карло	209
Митрошина М. М. Исследование инструментальной линейной поляризации БСВТ ИСЗФ СО РАН	210
Насонов Д. С. Измерение лучевых скоростей с применением абсорбционной ячейки	211
Отто И. П. Исследование колебательных и квазистационарных движений в атмосфере солнечных пятен	212
Панкратова Н. В., Соболев А. М., Кирсанова М. С., Васюнина Т. С., Крушинский В. В. Инфракрасные и оптические свойства областей образования массивных звезд в рукаве Персея	213
Поляков А. М. Влияние 2S3 метастабильного уровня гелия на ионизационную структуру туманности	214
Смирнов А. А. Неточности в спектральной классификации звезд каталога Tycho-2 Spectral Type	215
Смирнов Е. А. Современные численные методы интегрирования уравнений движения астероидов, сближающихся с Землей	216
Степанищев А. С. Влияние звездных скоплений на параметры эллипсоида скоростей	217
Троянский В. В. Модель земной тени в формализме численной теории DE405	218
Тудупова М. М. Построение профилей низкочастотного когерентного излучения пульсаров на основе модели синхротронного излучения	219
Хабибуллина М. Л. Статистические исследования слабых радиоисточников в полосе глубоких обзоров неба на радиотелескопе РАТАН-600	220
Хамагаев С. Т. Исследование временных вариаций крупномасштабных солнечных полей Солнца	221
Хоперсков С. А. Механизмы разогрева звездного галактического диска	222

Чернецова Т. А., Виноградова А. Б., Клеткина В. С. Содержание иттрия и циркония у звезд различных галактических населений	223
Шаповалов М. В. Характер связи между возрастом и металличностью в тонком диске	224
Шелемей О. В., Островский А. Б., Соболев А. М. Влияние вращения источника на форму и положение мазерных пятен в модели турбулентного слоя	225
Шолойко А. Н. Сопоставление эквивалентных ширин линии $\text{H}\alpha$ и параметров Стокса в протонной вспышке для линий с центральным обращением и без	226
Тезисы кратких сообщений	227
Алексейчук Р. А. Поведение облачной компоненты Галактики в области радиуса коротации	227
Балуев Р. В. Поиск и определение орбит внесолнечных планет методом лучевых скоростей	228
Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю., Батурин А. П. О программной системе построения поисковых эфемерид астероидов	229
Виноградова Н. С. Определение положений и собственных движений звезд в поле РЗС NGC 6882/5	230
Галеев А. И., Бикмаев И. Ф. Звезды — двойники и аналоги Солнца	231
Галеев А. И., Бикмаев И. Ф., Шиманский В. В., Иванова Д. В. Проблемы исследования звезд типа δ Щита по наблюдениям на телескопе РТТ150	232
Дремова Г. Н., Свечников М. А. Эффект приливной эволюции в оценке возраста ТДС	233
Кирсанова М. С., Соболев А. М., Юханссон Л. Е., Томасон М., Цивилев А. П. Исследование звездообразования в области G173.69+2.87	234
Кожевникова А. В., Алексеев И. Ю., Хекерт П. А., Кожевников В. П. Активность двух короткопериодических двойных систем типа RS CVn — BH Vir и WY Snc	235
Кононов Д. А. Исследование структуры течения вещества в системе SS Cyg методом доплеровской томографии	236
Костогрыз Н. М. Вероятные причины долгопериодических изменений геометрического альbedo Урана	237
Малафеев С. Ю. Исследование вариации степени ионизации в областях образования массивных звезд	238
Семенюк А. И., Мусцовой В. В., Храпов С. С. Численное моделирование вторжения радиоджетов из активных ядер галактик в окружающую среду	239

Токовенко А. А. Модель сближения астероида Apophis 99942 с Землей	240
Троицкий Н. Р., Зинченко И. И., Пирогов Л. Е. Оценки физических параметров областей массивного звездообразования, связанных с «холодными» IRAS источниками	241
Храмцова М. С. Вычисление избытка цвета РЗС по данным каталога точечных источников 2MASS	242
Шайдулин В. Ш. Сравнение гармонических коэффициентов некоторых современных моделей гравитационного потенциала Земли	243
Якобчук Т. Н. Звездный состав голубой компактной карликовой галактики SBS 1415+437	244
Стендовые доклады	245
Занкович А. М., Коваленко И. Г. Устойчивость ударной волны в остатке сверхновой на седовской стадии: теория и лабораторное моделирование	245
Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кайзер Г. Т., Кузнецов Э. Д., Вибе Ю. З., Малышева Л. К., Попов А. А. Позиционные ПЗС наблюдения на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории	246
Захарова П. Е., Кузнецов Э. Д. Оценка точности позиционных наблюдений геосинхронных спутников на гибридной телевизионной установке телескопа АЗТ-3 АО УрГУ	247
Калинина Н. Д., Салий С. В. Молекулярные ядра NGC 6334I и NGC 6334I(N)	248
Коваленко И. Г., Колов А. Н., Занкович А. М. Турбулентные модели квазисферической аккреции	249
Кожевников Д. Н. Распределение эквивалентных ширин профилей параметра Стокса	250
Коробцев И. В. Фотометр ИК-диапазона для астрономических наблюдений	251
Кочеров А. В. Моделирование коллапса межзвездных молекулярных облаков	252
Кузнецов Э. Д., Кудрявцев А. О. Исследование особенностей движения в окрестности неустойчивых стационарных точек геостационарной орбиты	253
Лямова Г. В. Особенности быстрых колебаний солнечных пятен в разных группах	254
Малыгин Д. А. Сравнение эквивалентных ширин профилей параметра Стокса в линии H с самообращением и в усах	255
Малышев А. И., Малышева Л. К. Условия образования предбиологических состояний на Титане	256

Никифорова Т. П., Сукманова С. В., Калинин А. А., Шагабутдинов А. И. Пробные наблюдения протуберанцев в АО УрГУ с ПЗС-камерой	257
Попов А. А., Заложных И. С., Крушинский В. В. Проект 40-см телескопа Астрономической обсерватории УрГУ . . .	258
Ромашин Г. С. Активные ИСЗ на ГСО в зоне 0—120 Е	259
Салий С. В., Соболев А. М. Исследование физических условий в молекулярном облаке G305.21+0.21 по квазитепловым линиям метанола	260
Семенюк А. И., Мусцовой В. В. Равновесная модель для исследования протяженных струйных выбросов из активных галактических ядер	261
Из истории науки	262
Захарова П. Е., Фролова Н. Б., Кузнецов Э. Д. 50 лет космической эры	263
Левитская Т. И., Начапкин М. Н. «Пробиться к звездам!» (к 100-летию со дня рождения Главного конструктора ракетно-космических систем С. П. Королева)	272
Литературные страницы	284
Шустов Б. М.	285
Калинина Н. Д.	286
Холшевников К. В.	287
Соловьев А. А.	288
Список участников	293

Научное издание

Физика Космоса

Труды 36-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург, Россия,
29 января — 2 февраля 2007 г.

Редактор Т. А. Федорова
Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий
Подписано в печать 23.01.07. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.
Уч.-изд. л. 18,45. Усл. печ. л. 17,67.
Тираж 150 экз. Заказ .

Издательство Уральского университета
620083, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.
Отпечатано в ИПЦ «Издательство УрГУ»
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел. (343)350-56-64.